



ETUDE DU DEVENIR DES NITRATES  
EN PROFONDEUR SUR LE SITE  
DE LA COOPERATIVE DE PLOUDANIEL (29)

---

Connaissances acquises au 30 avril 1987

87 SGN 302 BRE

Mai 1987

Département du Finistère

---

CONSEIL GENERAL

H. Talbo

## R E S U M E

L'étude de la migration des nitrates en profondeur entreprise sur le site de Ploudaniel a comme objectifs d'identifier le(s) phénomène(s) responsable(s) de l'absence de nitrates dans les eaux profondes, en définir le processus et les limites d'efficacité.

Les recherches sont réalisées sous la Maîtrise d'ouvrage du Département du Finistère et orientées par un Conseil Scientifique comprenant des membres du Conseil Général, de la Coopérative Laitière de Ploudaniel, de la Direction Départementale de l'Agriculture, de la Direction Régionale des Affaires Sanitaires et Sociales de Bretagne, de l'Agence de Bassin Loire-Bretagne, de l'Institut National de la Recherche Agronomique de Rennes, de l'Ecole Nationale Supérieure de Chimie de Rennes et de l'Ecole Nationale de la Santé Publique.

Son financement est assuré par le Département du Finistère, la Région Bretagne, la Coopérative Laitière de Ploudaniel, l'Agence de Bassin Loire-Bretagne, les Ministères de l'Agriculture, de l'Environnement et de la Santé.

Les questions posées, auxquelles il convenait de chercher une réponse peuvent être résumées en 4 points :

. dans quelles conditions l'eau souterraine présente-t-elle des teneurs en nitrates significativement différentes de celles des eaux de surface ou peu profondes ?

. cette meilleure qualité est-elle due à des phénomènes de dénitrification spontanée ? Si oui, quels en sont les processus et les limites ?

. s'agit-il d'une pollution retardée, les matières azotées infiltrées étant en cours de migration per descendum ? Si oui, dans quel délai les nappes seront-elles contaminées ?

. dans les secteurs où l'eau souterraine profonde serait déjà touchée, l'évolution défavorable va-t-elle se poursuivre du fait de l'arrivée de nitrates en cours de migration ? Si oui, dans quel délai les mesures qui seront prises auront-elles un effet sur la qualité des eaux ?

Les mouvements de l'eau souterraine sont très lents. Le temps nécessaire pour que la goutte d'eau tombée sur le sol et qui commence à s'infiltrer arrive à l'exutoire naturel ou artificiel de la nappe est (à Ploudaniel), d'au moins plusieurs années.

Cependant, la disparition des nitrates en profondeur n'est pas due à la durée de migration (pollution retardée), mais bien à des phénomènes de dénitrification, pressentis au moment où commençaient les travaux de Ploudaniel lorsqu'on a constaté que, systématiquement, l'abattement brutal des teneurs en nitrates coïncidait avec des horizons du sous-sol riches en pyrite et que les forages sans nitrates (dans les secteurs où les eaux superficielles sont très chargées) fournissent toujours une eau ferrugineuse ; on sait également, maintenant que l'abattement des nitrates s'accompagne systématiquement d'une augmentation des sulfates.

En 1985, les analyses de la composition isotopique " $\delta^{15}\text{N}$ " réalisées à l'Université de Paris IV (B. SIMON - Apports de la biogéochimie isotopique à la connaissance de la dénitrification dans les eaux souterraines - thèse 3ème cycle) ont démontré qu'il y avait bien dénitrification à Ploudaniel, ce qui a permis de focaliser les recherches engagées sur ces phénomènes.

Les travaux menés au Laboratoire de Chimie des Nuisances et Génie de l'Environnement (professeur G. Martin) de l'Ecole Nationale Supérieure de Chimie de Rennes (N. Abdi-Haider - Etude du rôle des sulfures et pyrite de fer dans la dénitrification en sous-sol - thèse Docteur-Ingénieur) ont permis de définir les processus et de reconnaître les réactions.

Les travaux de terrain, les analyses d'eau étant assurées par le Laboratoire des Eaux de l'Ecole Nationale de la Santé Publique, ont été orientés et été orientés par les actions de laboratoire.

Le rapport résume les travaux réalisés et les connaissances acquises et montre qu'il existe une bonne concordance des résultats théoriques et expérimentaux avec les mesures et observations faites in situ.

La dénitrification naturelle est due à la réduction des nitrates ( $\text{NO}_3$ ) en azote gazeux ( $\text{N}_2$ ) par la pyrite ( $\text{FeS}_2$ ), réaction facilitée et amplifiée par une activité biologique (*Thiobacillus denitrificans*). Si elle consomme de la pyrite, la dénitrification naturelle produit des sulfates (à des concentrations compatibles avec les normes de potabilité) et du fer, dont une partie est extraite avec l'eau, le reste précipitant dans le terrain, probablement de préférence à proximité des forages, ce qui devrait nécessiter de les décolmater périodiquement. L'eau exploitée doit être déferrisée, les procédés de déferrisation étant connus, fiables et peu onéreux (comparés aux coûts des procédés de dénitrification provoquée).

Les besoins en eau de la Coopérative de Ploudaniel ont été, de 1977 à 1986, assurés partiellement par de l'eau souterraine naturellement dénitrifiée, ils le sont totalement depuis 1986. La consommation est de l'ordre de 30 000 m<sup>3</sup> par mois, sans que la nappe montre des signes de surexploitation.

La durée de vie du "réacteur naturel" dépend de la quantité de nitrate à faire disparaître et de la quantité de pyrite présente ; elle doit se chiffrer en décennies, et n'est probablement pas inférieure à une centaine d'années.

Le rendement de la réaction dépend moins de la teneur initiale de l'eau en NO<sub>3</sub> que de la charge volumique (poids de NO<sub>3</sub> par unité de volume de matériel dénitrifiant et par unité de temps). Dans la nature, il ne semble pas que la charge volumique puisse excéder le 1/100 (ordre de grandeur) de la charge volumique maximale admissible définie en laboratoire.

Depuis le début des travaux de Ploudaniel, d'autres sites sans nitrates ont été identifiés, confirmant que, si les phénomènes de dénitrification naturelle ne sont pas la règle générale, ils ne sont pas exceptionnels pour autant. En fin de rapport sont présentés quelques tests de méthodes destinées à aider à la détection des zones dénitrifiantes.

## S O M M A I R E

	Page
1 - CONNAISSANCES ACQUISES	
11 - Résultats principaux obtenus par le Laboratoire de Chimie des Nuisances et Génie de l'Environnement .....	1
11.1 - Essais en discontinu .....	1
11.2 - Etude sur colonnes alimentées en continu .....	2
11.21 - Vitesse de passage et rendement de la dénitrification .....	4
11.22 - Charge volumique et rendement de la dénitrification .....	5
11.23 - Conséquences pour le terrain .....	5
11.3 - Simulation d'une alimentation constante et d'un soutirage variable .....	6
2 - MESURES ET OBSERVATIONS DE TERRAIN	
21 - Les dispositifs - Rappel .....	9
22 - Principaux résultats .....	11
22.1 - porosité .....	11
22.2 - Stock d'azote .....	11
22.3 - Présence de sulfures dans le sous-sol .....	12
22.4 - Activité biologique dans le sous-sol .....	15
22.5 - Vitesse des transferts souterrains .....	17
22.51 - Milieu non saturé .....	17
22.52 - Milieu saturé .....	19
22.521 - principe des mesures .....	19
22.522 - Conditions expérimentales .....	20
22.523 - Réalisation des marquages .....	22
22.524 - Résultats des marquages .....	23
22.6 - Composition de l'eau dans les éléments de la Flûte de Pan .....	28
3 - CONSEQUENCES DE LA DENITRIFICATION NATURELLE	
31 - Consommation et production de matière .....	32
32 - Hypothèse de durée de vie du réacteur naturel .....	32
33 - Conséquences pour les forages d'exploitation .....	33

.../...

	Page
4 - DETECTION DES SECTEURS DENITRIFIANTS	
41 - A partir des forages existants .....	34
41.1 - Cas du secteur de Plouéan .....	34
41.2 - Cas du secteur de Ploudalmézeau .....	35
42 - En l'absence de forages existants .....	39
42.1 - Pourquoi l'intervention de la géochimie ? .....	40
42.2 - Réalisation des tests .....	40
42.3 - Interprétation des résultats .....	41
5 - EXPLOITATION DE L'EAU SOUTERRAINE PAR LA COOPERATIVE	
Réponse de la nappe .....	42
CONCLUSION ..	46

## 1 - CONNAISSANCES ACQUISES

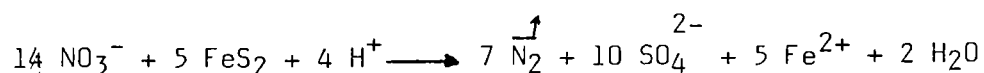
## 11 - RESULTATS PRINCIPAUX OBTENUS PAR LE LABORATOIRE DE CHIMIE DES NUISANCES ET GENIE DE L'ENVIRONNEMENT

### 11.1- Essais en discontinu

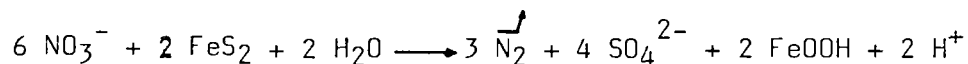
Des essais en discontinu ont été réalisés en utilisant des cuttings fournis par la réalisation des ouvrages FP2, FP3 et FP5 (cf. plus loin). Les cuttings contiennent des porteurs de Fe et de S ; l'analyse microbiologique y a montré l'existence de Thiobacillus dénitrificans.

La réaction de dénitrification est lente, atteint un palier après quelques heures, et son rendement est faible. Elle se produit en deux phases:

- . dans la première phase, si  $E_h < -0,200$  volts, la réaction s'écrit



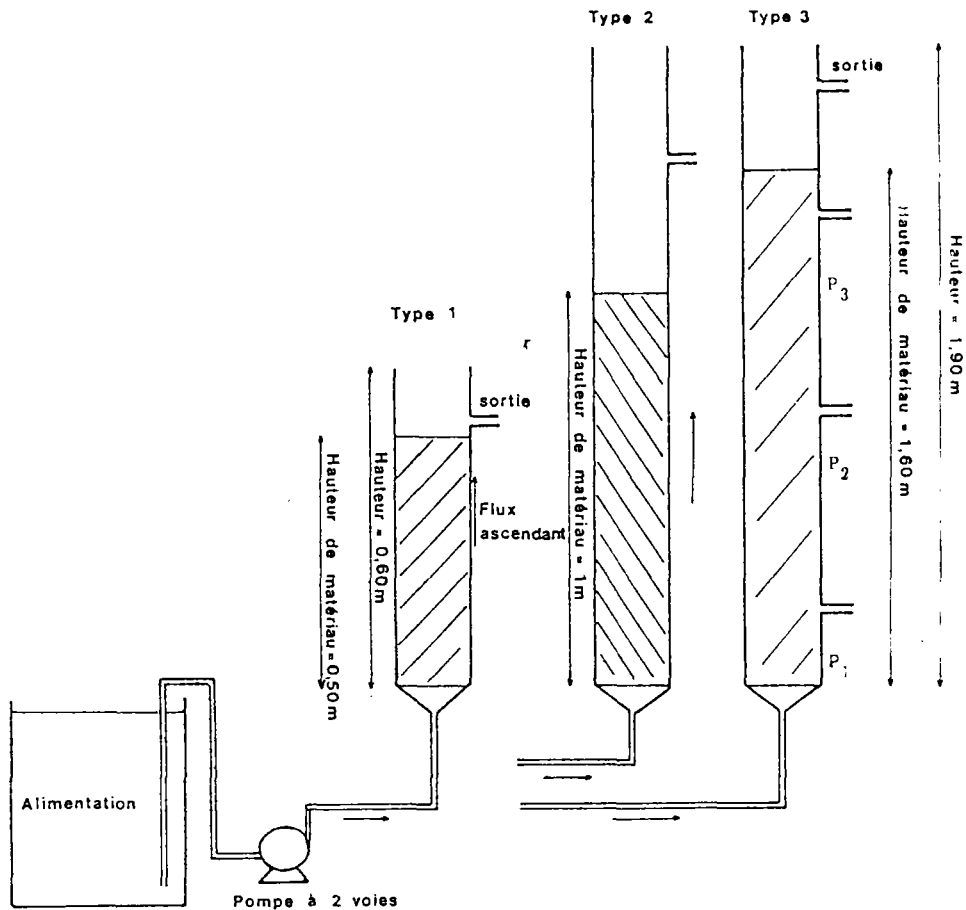
- . dans la seconde phase, il se produit une action simultanée des ions ferreux et sulfures libérés lors de la dissolution de la pyrite. Pour  $-0,1 < E_4 < 0,0$  volts, la réaction s'écrit



Dans certains essais, l'existence de Thiobacillus denitrificans a été reconnue, mais en faible concentration ; ainsi, leur rôle n'est probablement pas très important, mais la dénitrification lente doit pouvoir être augmentée en apportant un inoculum de Thiobacillus denitrificans.



## 11.2- Etude sur colonnes alimentées en continu



Dispositif expérimental : lits immergés

Le matériau est constitué par un mélange de maërl et de minéral de "Porte aux Moines" (riche en pyrite, chalcopryrite et blende),ensemencé en thiobacillus denitrificans (préparation d'un inoculum et mise en pré-culture des colonnes).

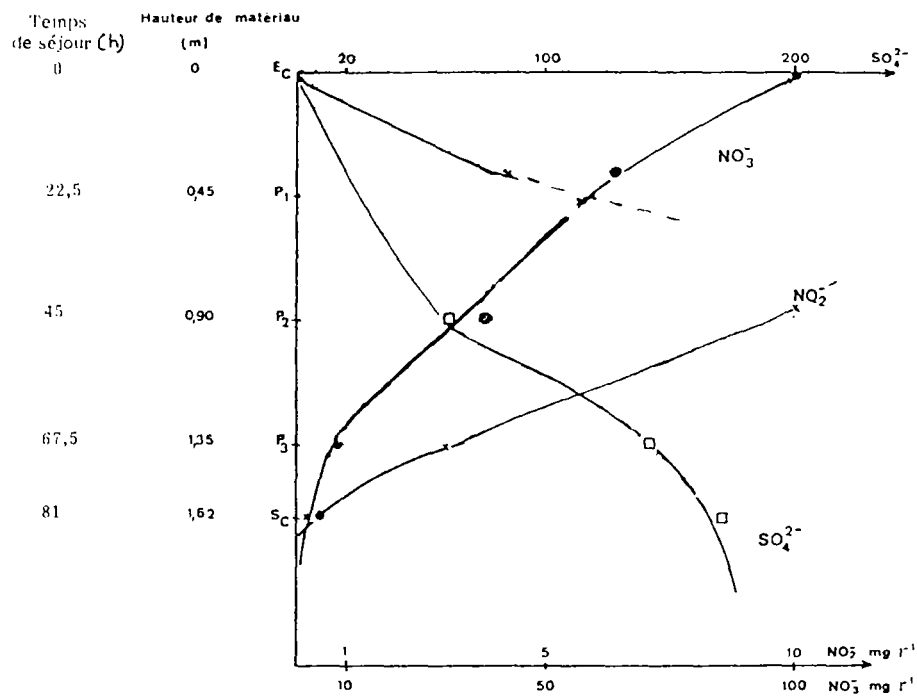
Pour une vitesse de passage de  $2 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$ , l'évolution aux différentes hauteurs de matériaux des  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  et Fer montre

- la disparition des nitrates, en 1,6 m de cheminement (80 heures de temps de séjour)

- les nitrites apparaissent, montrent un pic de 10 mg/l vers 0,9m (45 heures de temps de contact), puis disparaissent

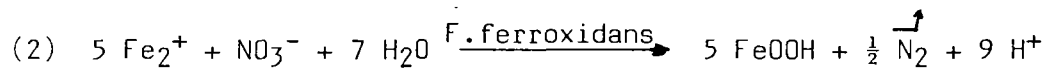
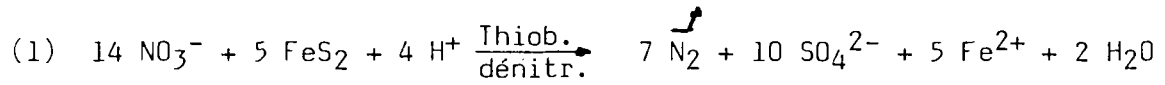
- des  $SO_4^{2-}$  sont produits, à peu près symétriquement à la disparition des  $NO_3^-$

- le fer existe à très faible concentration : il semble qu'il précipite dans le lit.

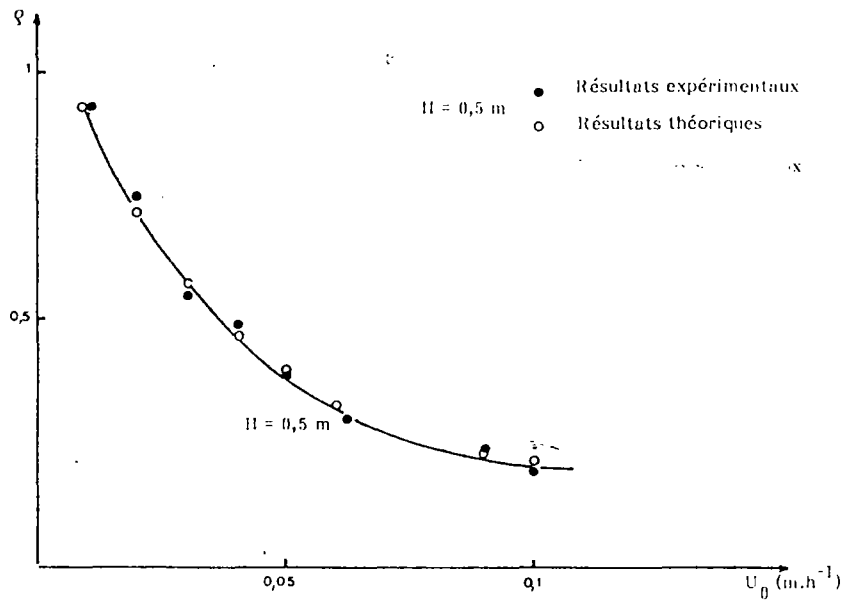


Profil  $NO_3^-$ ,  $NO_2^-$ ,  $SO_4^{2-}$  sur la colonne type 3  
pour  $C_v = 0,03\ kg\ NO_3^- / m^3$  de matériau.

Les relations qui semblent se produire peuvent s'écrire :



### 11.21 - Vitesse de passage et rendement de la dénitrification

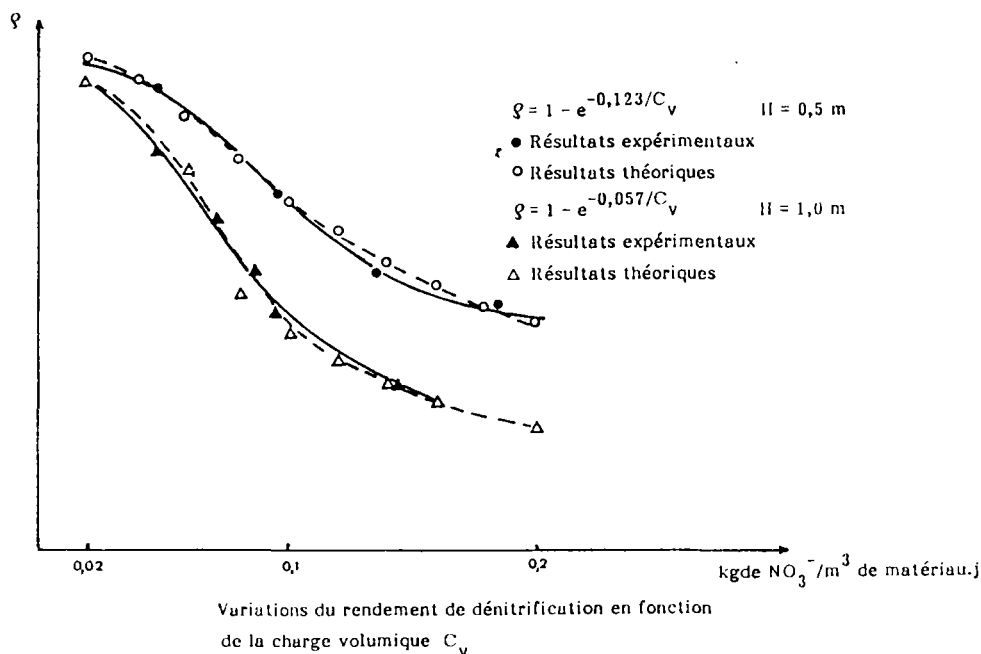


Variations du rendement de dénitrification en fonction de la vitesse de passage.

La courbe ci-dessus représente les résultats obtenus par des essais correspondant à des vitesses de passage de 0,1 à 0,01 m.h<sup>-1</sup> soit, pour une colonne de 0,5 m, des temps de contact de 5 à 50 heures.

### 11.22 - Charge volumique et rendement de la dénitrification

La charge volumique est fonction de la vitesse de passage dans la colonne et de la hauteur de matériau disponible, c'est-à-dire du temps de passage. Pour une concentration initiale de l'ordre de 100 mg/l, et une température de 10°C, les résultats sont figurés sur le graphique ci-dessous, pour 2 hauteurs de colonne : 0,5 m et 1 m.



La charge maximale admissible pour un rendement de plus de 90 %, avec des hauteurs de matériaux de 0,5 et 1 m est de l'ordre de 0,02 kg NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/jour/m<sup>3</sup> de matériaux. Dans l'exemple précédent (colonne de 1,6 m, vitesse de 2 cm/h), la charge maximale admissible était de l'ordre de 0,03 kg NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/jour/m<sup>3</sup> de matériaux.

### 11.23 - Conséquences pour le terrain

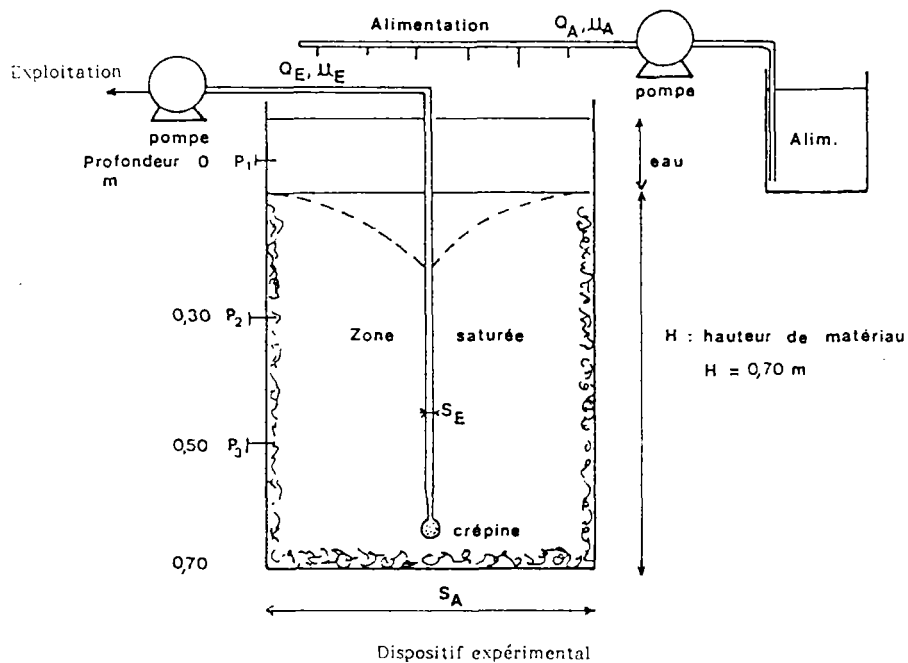
La dénitrification suppose dans le sous-sol la présence de sulfures (notamment de pyrite) et de bactéries (Thiobacillus denitrificans); le processus, très rapide, s'effectue en quelques décimètres, ce qui correspond bien aux observations de terrain (abattement des teneurs en NO<sub>3</sub> en quelques mètres); le rendement du phénomène dépend :

- du temps de contact : vitesse de passage et épaisseur de matériel dénitrifiant. A priori, dans le terrain, l'épaisseur est importante, d'une ou deux puissance de 10 supérieure à la hauteur des colonnes de laboratoire; pour des débits de percolation comparables, les vitesses de transfert doivent par contre être supérieures (porosité efficace plus faible dans le terrain),

- de la charge volumique : poids de nitrate dans l'eau initiale et volume de matériel dénitrifiant traversé. Là encore, le terrain est surdimensionné par rapport aux besoins. Une charge volumique maximale admissible de  $0,03 \text{ kg NO}_3^-/\text{jour}/\text{m}^3$  de matériel, si elle percole verticalement représente une infiltration journalière de  $300 \text{ l d'eau à } 100 \text{ mg/l NO}_3^-$  par  $\text{m}^2$  de superficie. Or, en tout état de cause, les précipitations efficaces annuelles moyennes sont de l'ordre de  $530 \text{ mm}$ , soit, réparties sur 6 mois, une infiltration journalière de l'ordre de 3 litres seulement;

### 11.3 - Simulation d'une alimentation constante et d'un soutirage variable

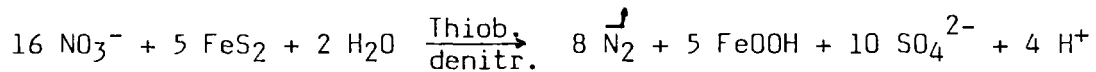
La cuve a été chargée avec du matériel naturel : cuttings d'un forage réalisé au Rest en Plouéan, ensemencé en *Thiobacillus denitrificans*.



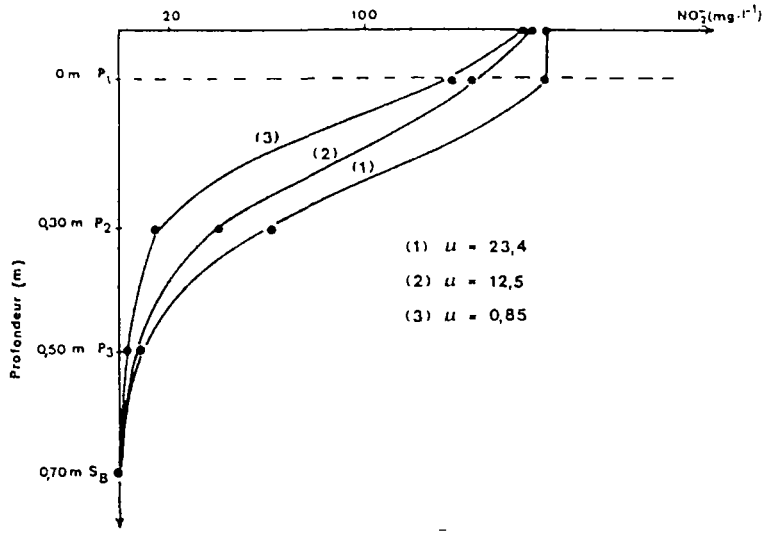
Deux séries d'essais ont été réalisées, pour lesquels les paramètres vitesse ont été exprimés sous forme d'un rapport  $U = \frac{UE}{UA}$ , avec UA = charge hydraulique d'alimentation et UE = charge hydraulique de pompage.

La première série d'essais a été réalisée avec une alimentation constante de 0,02 l/heure (0,125 mm/h), et la deuxième série d'essais avec une alimentation de 0,04 l/heure (0,250 mm/h). Dans les deux cas, les débits de soutirage ont été au maximum égaux aux débits d'alimentation.

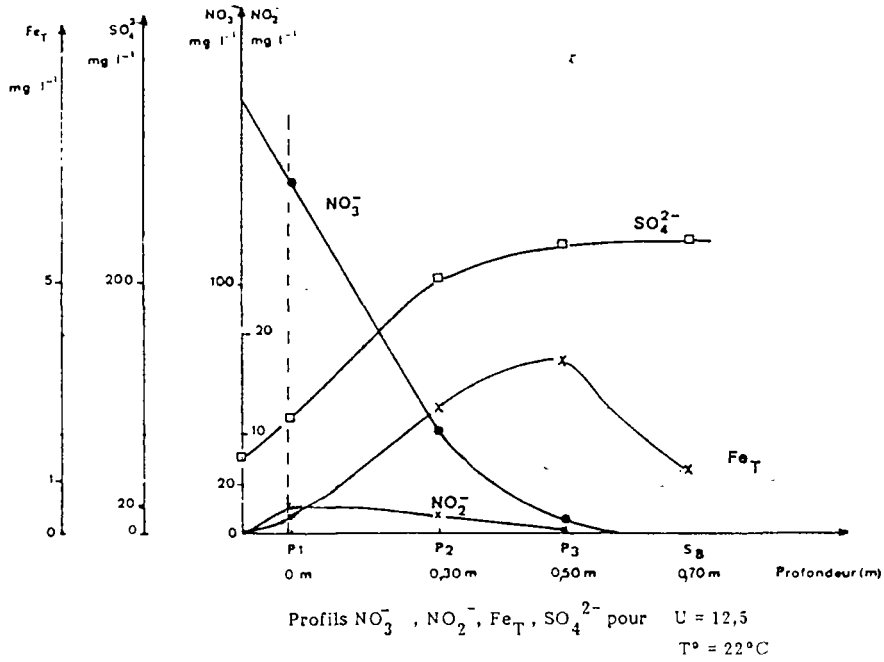
La réaction correspondant à l'évolution des différents paramètres de haut en bas du profil s'écrit :



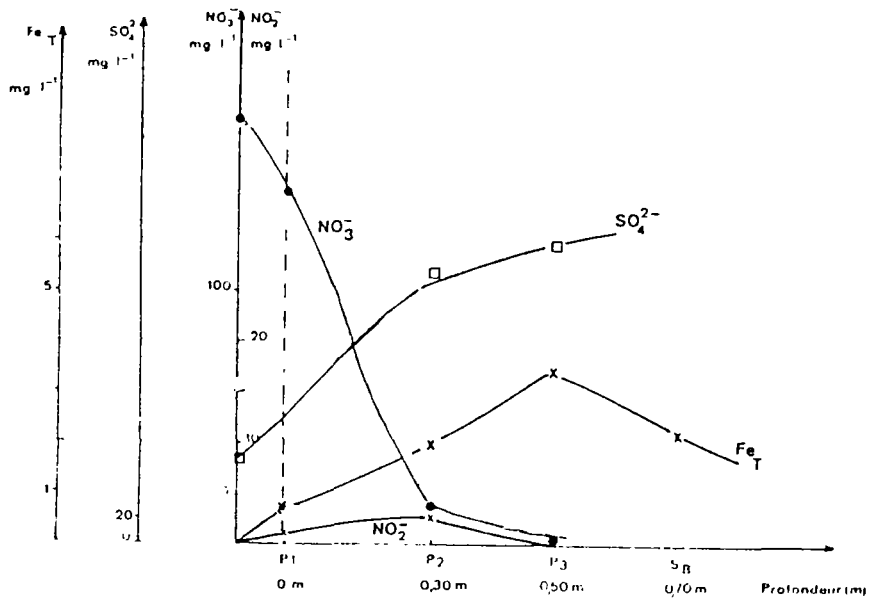
L'élimination des nitrates s'accompagne d'une production d'azote moléculaire et de sulfate. Le fer produit à l'état ferrique précipite dans le lit. Lorsque les nitrates n'existent plus, les sulfates ne sont plus produits. On assiste à une production de fer qui diminue au niveau du piquage P<sub>3</sub>. Cette chute tardive de la teneur du fer s'expliquerait par l'existence d'une cinétique de précipitation lente (le fer est déplacé avant de pouvoir précipiter). La réaction précédemment écrite donne une idée sur l'évolution des différents paramètres  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Fe}_T$ . Elle n'incorpore pas les consommations de C; N et P pour la biosynthèse cellulaire.



Evolution des  $\text{NO}_3^-$  le long du pilote en fonction de U pour  $C_0 = 160 - 180 \text{ mg.l}^{-1}$



Profils  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{Fe}_T$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  pour  $U = 12,5$   
 $T = 22^\circ\text{C}$



Profils  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Fe}_T$  pour  $U = 0,85$   
 $T = 20,2^\circ\text{C}$

## 2 - MESURES ET OBSERVATIONS DE TERRAIN

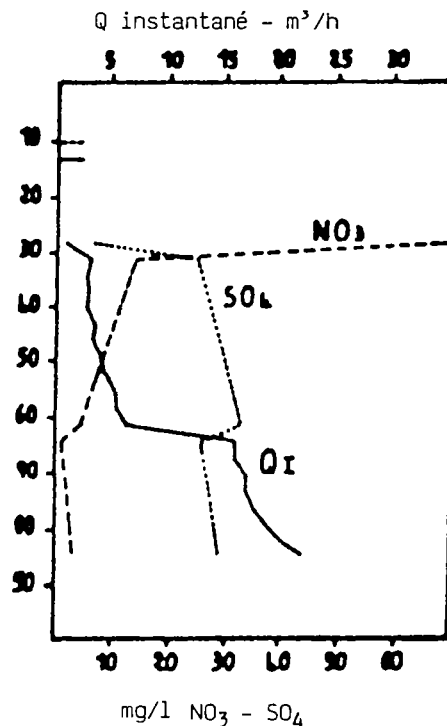


## 21 - LES DISPOSITIFS - RAPPELS

Outre les divers piézomètres et forages permettant de contrôler les évolutions du niveau de la nappe, le site de Ploudaniel est équipé de

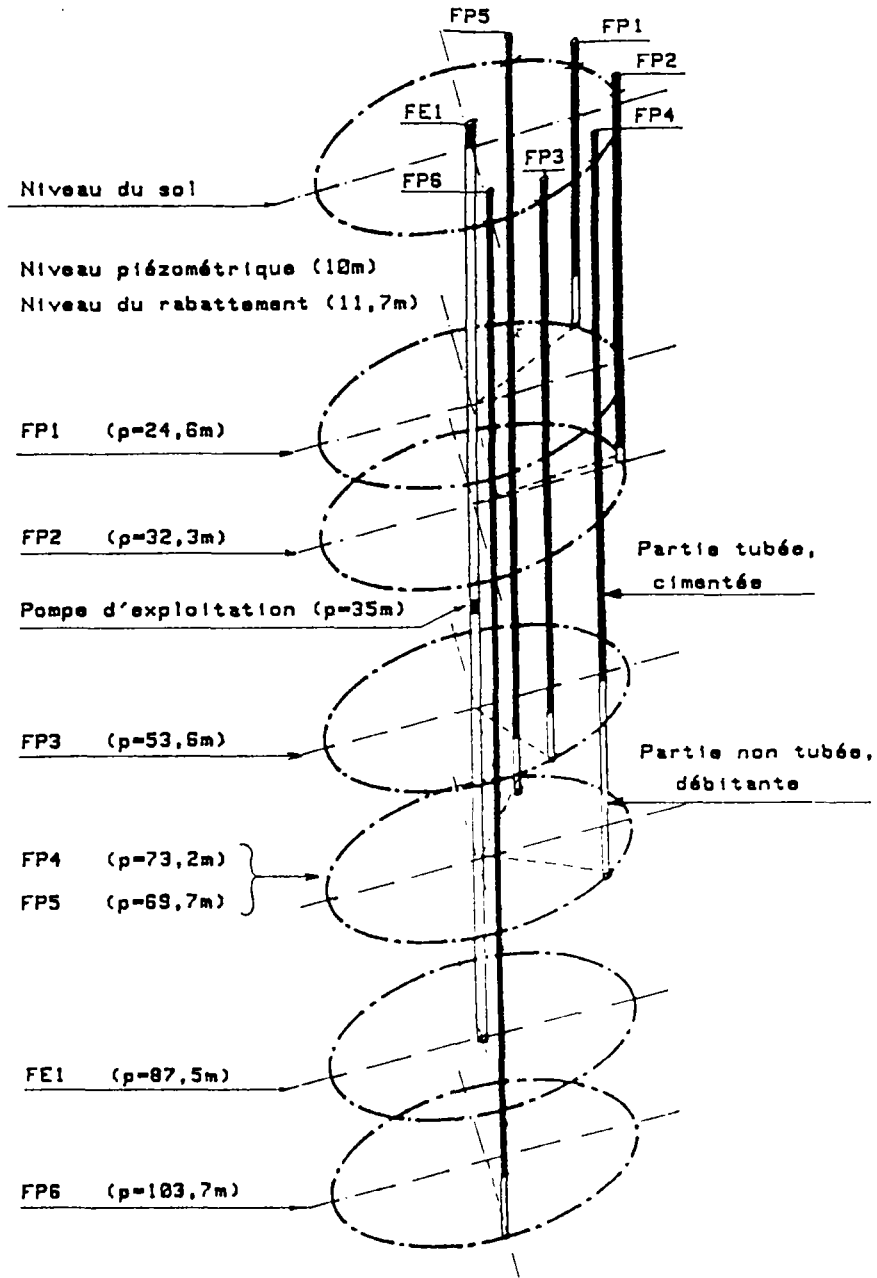
- deux dispositifs permettant de suivre les variations de composition de l'eau dans la tranche supérieure des terrains non saturés. Les dispositifs, numérotés B1 et B2 sont constitués de céramiques poreuses posées tous les 0,5 m, de -0,5 m à -10,5 m de profondeur, échantillonnés en moyenne tous les trois mois.

- un dispositif "flûte de Pan" permettant d'observer ce qui se passe dans la tranche saturée du sous-sol. La flûte de Pan est constituée de 6 piézomètres ouverts à différentes profondeurs, disposés sur un demi cercle de rayon 15 m dont le centre est un forage exploité (FE 1) par la Coopérative. En se basant sur les observations faites lors de la réalisation de FE 1 et qui, en raison de la grande hétérogénéité de détail n'ont pas été retrouvées aux mêmes profondeurs dans les piézomètres :



les éléments de la flûte de Pan ont été réalisés pour permettre

- FP1, l'échantillonnage au niveau des fortes teneurs
- FP2, l'échantillonnage des teneurs intermédiaires



SCHEMA DU DISPOSITIF EN "FLÛTE DE PAN"

- FP3, l'échantillonnage au niveau où les nitrates disparaissent
- FP4, l'échantillonnage au toit de l'arrivée d'eau
- FP5, l'échantillonnage au début de l'arrivée d'eau
- FP6, l'échantillonnage de l'arrivée d'eau importante

En fait, FP1 est sans doute un peu trop profond et capte un niveau où la dénitrification est déjà amorcée (la première eau qui a pu être analysée lors de la mise en place du forage FE 1 contenait 80 mg/l NO<sub>3</sub> et 7 mg/l SO<sub>4</sub>).

## 22 - PRINCIPAUX RESULTATS

### 22.1 - Porosité

La porosité du sous-sol n'est pas connue, cependant, la teneur en eau des horizons non saturés (prélèvements réalisés lors de la pose des céramiques) permet de l'approcher

- en B1, elle varie, *en poids* (en ne tenant pas compte de 2m supérieurs) de 4,7 à 12,2 %, avec une valeur moyenne de 8,5 %

- en B2 (deux premiers mètres exceptés) les extrêmes sont 2,3 % à 10 m et 13,9 % à 7 m de profondeur ; la moyenne est de 6,6 %, assez voisine de la moyenne observée en B1.

Pour une densité du terrain proche de 2,2, la teneur en eau des horizons non saturés pourrait être de l'ordre de 13 à 18 % du volume total.

### 22.2 - Stock d'azote

La quantité d'azote contenue, au moment de la mise en place des dispositifs, dans l'eau percolant dans les horizons non saturés vers la nappe correspond

- au niveau du dispositif B1 (sous maïs fourrage), à 365 kg (exprimé en N) par hectare, soit pour une porosité supposée voisine de 15 % une teneur moyenne dans l'eau de l'ordre de 100 mg/l NO<sub>3</sub>

- au niveau du dispositif B2 (sous friche depuis plusieurs années), à 280 kg (exprimé en N) par hectare, soit pour une porosité de l'ordre de 15 %, l'azote en cours de migration étant supposé - ce qui est inexact - réparti de façon homogène, une teneur moyenne de l'eau venant alimenter la nappe de l'ordre de 78 mg/l NO<sub>3</sub>.

Ces ordres de grandeur correspondent en effet assez bien aux teneurs mesurées dans les céramiques poreuses.

### 22.3 - Présence de sulfures dans le sous-sol

L'analyse minéralogique des cuttings de FP2 - FP3 et FP5 montre la présence de divers sulfures. La pyrite est présente à tous les niveaux, ainsi que la marcassite.

PLOUDANIEL (Finistère)	Echantillons de granulats d = 2,9											
	FP 2		FP 3								FP 5	
	21-28	32-34	28-32	31-34	34-37	37-40	40-43	43-46	46-49	49-52	10-30	34-37
Blende ZnS	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Pyrite FeS <sub>2</sub>	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Galène PbS	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Chalcopyrite CuFeS <sub>2</sub>	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Cuivre gris (Cu,Fe,Zn,Hg,Ag) <sub>12</sub> (Sb,As) <sub>4</sub> S <sub>13</sub>											.	
Mispickel FeAsS (arsenopyrite)	.					.	.			.	.	.
Pyrrhotite FeS	.						.					.
Marcassite FeS <sub>2</sub>	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Nickeline NiAs	.											
Zircon		.			.		.					
Leucoxène				.	.				.	.		
Iménite Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>				.			.			.		
Chromite FeCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub>				.								
Graphite C	.		.	.	.		.			.		

Pour mémoire : des analyses ont également été effectuées sur des déblais de forages réalisés à Plouéan (Kergoz - Kerlaudy - le Rest) et Taulé (station de pompage) où la disparition brutale des nitrates avait été observée ; on y retrouve bien de la pyrite à tous les niveaux .

LABORATOIRE B.R.G.M. NANTES Date 25.06.86 Mission	Cassitérite	Scheelite	Tourmaline	Galène	Cinabre	Or	Monazite	Rutile	Zircon	Biotite	Magnétite	Ilménite	Grenat	Stauronite	Disthène	Andalousite	Amphibole	Epidote	Sidérite	Pyrite	AUTRES MINÉRAUX ET OBSERVATIONS	
																						Niobite
NUMÉRO DU PRÉLEVEMENT																						
PLOUENAN (29N) Kergoz 5,700kg 0 - 13,50 m				tr																+		Pyromorphite tr
4,950kg 13,50 - 23,50 m				tr																X		mtr
PLOUENAN (29N) Kerlaudy SICA 0-22,50m 4,680kg	0,05						mtr					+										Cassi roulée
4,850kg 22,50 - 67 m	mtr			mtr																		Cassi roulée
PLOUENAN (29N) Le Rest 6,580kg 0 - 34 m							mtr		mtr									+				Pyrrho- Molybdonite tine mtr
5,900kg 34 - 67 m																						mtr
1,500kg 67 - 100 m																		+		+		mtr
PLOUESCAT (29N) Station pompage 0-34m 3,660kg							mtr															
3,860kg 34 - 67 m				mtr			mtr															
4,460kg 67 - 100,80 m				mtr			mtr															



22.4 - Activité biologique dans le sous-sol

Echantillons examinés		Activité biologique Présence de <i>Thiobacillus denitrificans</i>
FP 1	19 - 22 m	x
	22 - 25 m	x
	25 - 28 m	
FP 2	21 - 28 m	} néant
	31 - 34 m	
FP 3	28 - 31 m	
	31 - 34 m	
	34 - 37 m	
	37 - 40 m	
	40 - 43 m	
	43 - 46 m	x
	46 - 49 m	
FP 4	19 - 22 m	
	22 - 25 m	
	25 - 28 m	
	28 - 31 m	
	31 - 34 m	
	34 - 37 m	
	37 - 40 m	
	40 - 43 m	
	43 - 46 m	
	46 - 49 m	
	49 - 52 m	
	52 - 55 m	x
	55 - 64 m	
	64 - 67 m	x
67 - 69 m		
FP 5	0 - 4 m	x
	4 - 7 m	
	10 - 30 m	x
FP 6	94 - 97 m	

### COMMENTAIRES

En confrontant ces données avec les dosages  $\text{NO}_3$  qui ont pu être faits au cours de la foration (pour diverses raisons, il n'a pas été matériellement possible de les faire systématiquement tous les 3 m):

FP1 : de 22 à 28 m, la teneur en  $\text{NO}_3$  diminue de 75 à 65 mg/l. Un échantillon prélevé après réalisation du forage donne 44,2 mg/l - un autre prélevement (24/12/85) donne 39,7 mg/l. A ces niveaux, la dénitrification semble déjà active (elle doit se poursuivre plus bas), ce qui est très cohérent avec l'activité biologique entre 19 et 25 m.

FP2 : 75 mg/l  $\text{NO}_3$  à 22 m de profondeur, 10 mg/l à 34 m. Un échantillon global donne, le 20/06/85 : 25,4 mg/l  $\text{NO}_3$ , le 24/12/85 : 32,8 mg/l. Ces données, très comparables à ce qui est observé en FP1 supposeraient une activité biologique, qui n'a pas été identifiée. Mais l'eau circule, les *Thiobacillus* peuvent être absents de la verticale explorée par le forage tout en en étant proches.

FP3 : La teneur en  $\text{NO}_3$  diminue fortement de 19 m de profondeur (79 mg/l) à 37 m (23 mg/l) ; elle reste relativement stable jusqu'à 46 m puis diminue brutalement entre 46 et 52 m. L'activité biologique identifiée entre 40 et 43 m ne se manifeste pas par une dénitrification importante, par contre il y a une très bonne cohérence entre la chute des  $\text{NO}_3$  entre 46 et 52 m et l'activité biologique entre 49 et 52 m.

FP4 : Une seule mesure de nitrates à été faite en cours de foration : à 70 m, la dénitrification est déjà quasi totale - les échantillons globaux prélevés le 26/06 et le 24/12 donnent 0,7 et 0,5 mg/l  $\text{NO}_3$ . Ceci est cohérent avec une activité biologique identifiée au-dessus de 69 m.

FP5 : En cours de foration, la dénitrification est quasi totale dès 32 m de profondeur. Les échantillons globaux donnent 0,7 mg/l le 20/06 et 0,4 mg/l le 24/12. Ceci est cohérent avec une activité située au-dessus de 32 m.

FP6 : En cours de foration, la dénitrification est déjà réalisée à 40 m de profondeur. Les échantillons globaux donnent 0,8 mg/l  $\text{NO}_3$  le 20/06 et 0,5 mg/l le 24/12. les seuls échantillons de terrains qui ont pu être examinés (94 et 97 m) sont très en-dessous de la dénitrification active et l'absence d'activité biologique n'est pas incohérente avec le reste.

*Le sous-sol du site de Ploudaniel contient des éléments (pyrite et Thiobacillus denitrificans) nécessaires aux processus de dénitrification reconnus en laboratoire.*



## 22.5 - VITESSE DES TRANSFERTS SOUTERRAINS

### 22.51 - MILIEU NON SATURE

Les graphiques ci-après représentent les profils  $\text{NO}_3$  et Cl observés aux prélèvements effectués dans les céramiques poreuses en février 1986 et février 1987.

Dans les parties médianes et basses, les teneurs fluctuent, mais l'emplacement des pics, maximaux et minimaux, reste stable : on n'observe pas, jusqu'à présent une descente d'ensemble des profils.

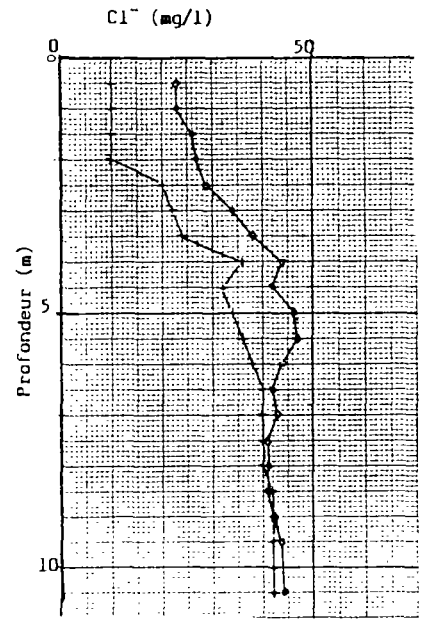
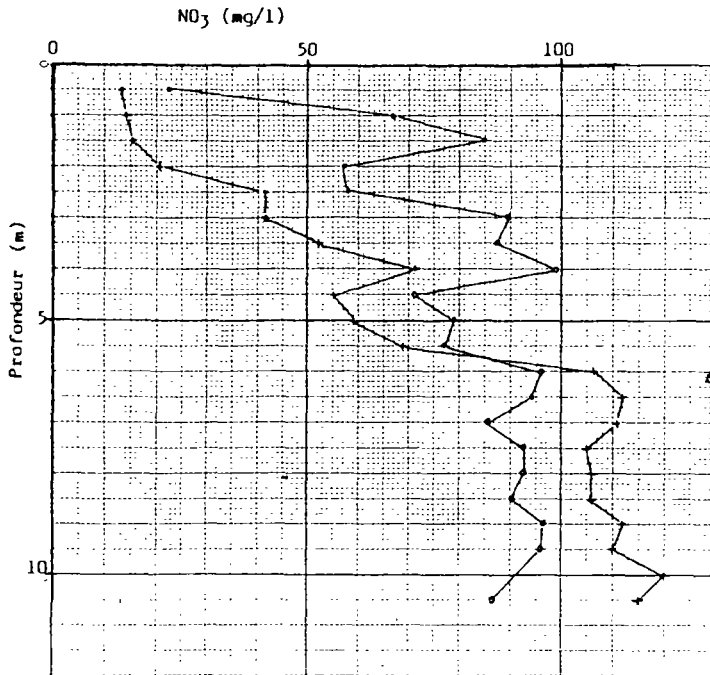
Les parties hautes, par l'arrivée d'eau de pluie non chargée (il n'y a plus d'épandages de fertilisants au droit des dispositifs, depuis juin 1985 pour B1, depuis quelques années pour B2) sont "nettoyées" des nitrates et chlorures qu'elles contenaient. Il semble que ce lessivage ait progressé de *1,5 m en 12 mois*.

CERAMIQUES POREUSES

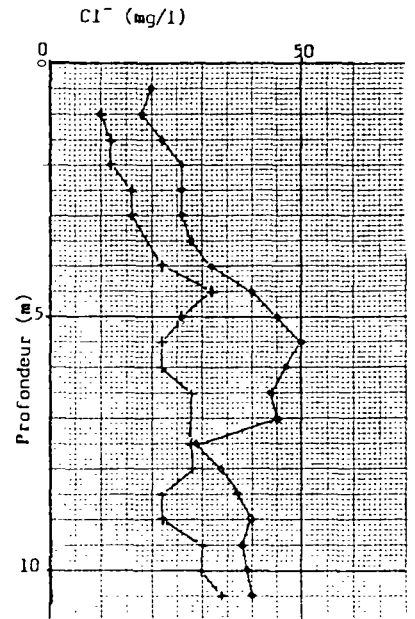
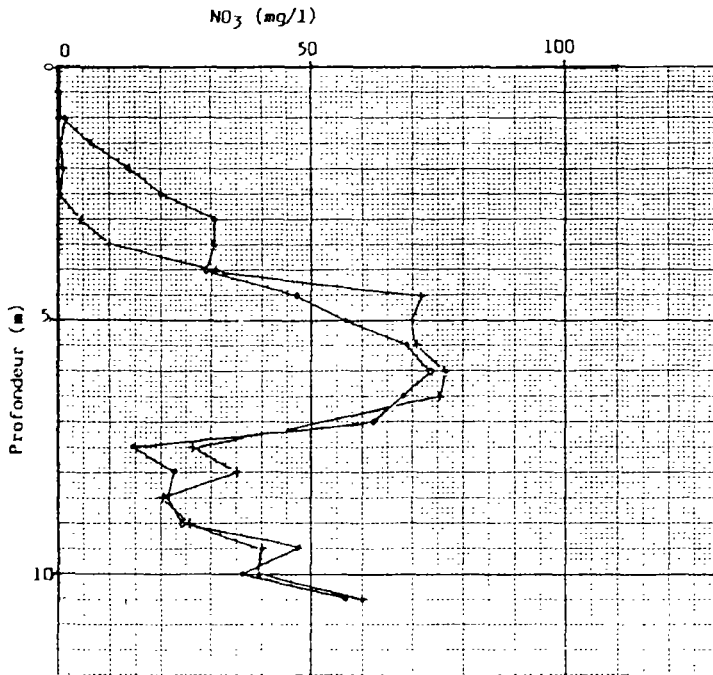
o prélèvements de février 1986

+ prélèvements de février 1987

DISPOSITIF B 1



DISPOSITIF B 2



## 22.52 - MILIEU SATURE

Un multitraçage a été réalisé par la Section d'Application des Traceurs du CNGE. Lancé le 6 juin 1986, l'essai a été poursuivi pendant 4 mois ; dans les conditions de l'expérimentation (pompage constant à 14,4 m<sup>3</sup>/heure), il a permis de mettre en évidence trois catégories de circulations :

- des circulations rapides, avec des temps d'arrivée du traceur, compris entre 1 et 10 heures pour les couches de l'aquifère situées vers -70 mètres de profondeur,
- des circulations lentes, avec des temps d'arrivée du traceur, compris entre 30 et 100 heures pour les couches de l'aquifère situées entre -70 et -100 mètres de profondeur
- des circulations extrêmement lentes, voire nulles ou difficilement décelables, pour les couches de l'aquifère situées au-dessus de -55 mètres de profondeur.

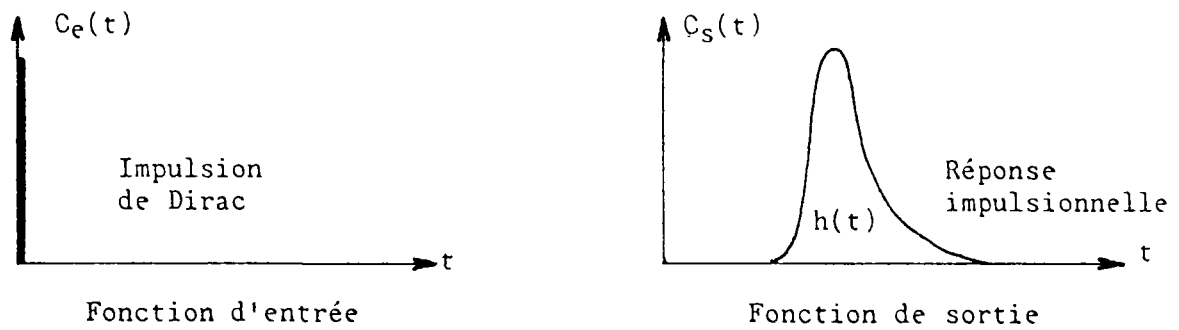
### 22.521 - Principe des mesures

La méthode consiste à observer les modalités de transfert de l'eau de différentes couches de l'aquifère vers un puits de pompage en exploitation continue.

A cet effet, l'eau de chacune des couches de l'aquifère est rendue identifiable dans l'eau pompée, par son marquage momentané avec un traceur. Ce marquage est réalisé par l'injection d'une solution de traceur au niveau de la couche étudiée, au fond d'un piézomètre foré à la profondeur de celle-ci.

Si plusieurs couches sont étudiées un multitraçage est réalisé avec des traceurs mesurables séparément.

Les informations recherchées sont données par la fonction de restitution théorique, que l'on obtiendrait si la fonction d'entrée était instantanée (impulsion Dirac). Cette fonction, appelée "Réponse impulsionnelle" caractérise les écoulements entre le piézomètre d'injection et le puits de pompage.



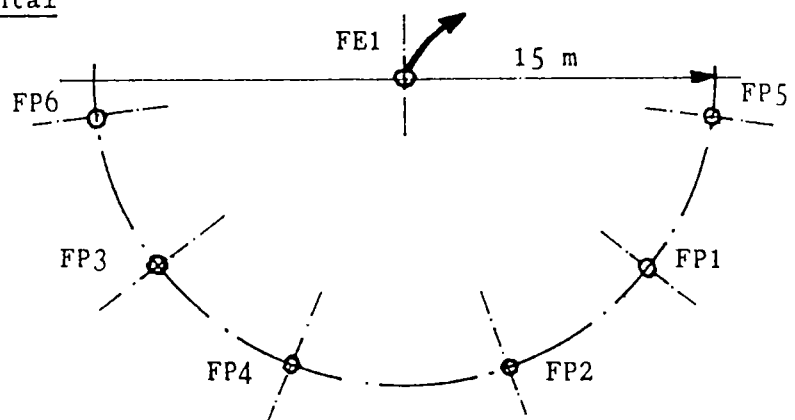
En pratique, si la durée de la fonction d'entrée est négligeable devant la durée de la fonction de sortie, cette dernière est représentative de la réponse impulsionnelle recherchée. Par contre, si la durée de la fonction d'entrée n'est pas négligeable, il devient nécessaire d'utiliser un modèle mathématique pour déterminer la fonction théorique  $h(t)$  qui convoluée à la fonction d'entrée  $C_e(t)$  donnera une fonction de sortie  $C_s(t)$  qui s'ajustera au mieux à la fonction de sortie expérimentale -  $C_s(t) = C_e(t) * h(t)$ .

### 22.522 - Conditions expérimentales

#### Localisation du site

Le site expérimental est situé en Bretagne, à 20 km au Nord-Est de Brest, à proximité de la coopérative laitière de Ploudaniel (Finistère) au Sud de Le Folgoet (Figure 1).

#### Dispositif expérimental



Le dispositif expérimental est constitué d'un puits de pompage FE1 et d'une série de six piézomètres répartis en un demi-cercle de rayon 15 mètres autour de FE1.

Le puits de pompage a une profondeur de 87,5 mètres et la pompe est implantée à 35 mètres de profondeur. Les six piézomètres sont forés à des profondeurs comprises entre 24 et 103 mètres et sont tubés sur la majeure partie de leur hauteur afin de n'intercepter que des couches particulières de l'aquifère, choisies en fonction des arrivées d'eau rencontrées lors du forage.

La répartition en demi-cercle de ces piézomètres de profondeurs différentes est appelée "dispositif en Flûte de Pan" (FP.). Les principales caractéristiques mécaniques et hydrauliques de ces forages sont regroupées dans le tableau qui suit.

Caractéristiques des forages						
Piézomètre Ø int.105	FP1	FP2	FP3	FP4	FP5	FP6
Profondeur théorique (m)	24,00	35,00	55,00	73,00	69,00	103,00
Profondeur mesurée le 10/6 (m)	24,60	32,35	53,58	73,20	69,75	103,70
Longueur tubée en PVC Ø 112x125 (m)	20,00	31,00	50,00	64,00	64,00	87,50
Hauteur débitante (m)	4,60	1,35	3,58	9,20	5,75	6,20
Volume d'eau de la hauteur débitante (l)	40	11,7	31	79,6	50	53,7
Niveau piézo avant pompage le 10/6 à 11h40 (m)	10,07	10,28	10,09	9,84	9,95	9,19
Niveau piézo après stabilisation le 17/6 à 14h40 (m)	11,87	12,39	11,44	11,48	11,72	11,36
Hauteur d'eau totale (m)	12,73	19,96	42,14	61,72	58,03	92,34
Volume d'eau total (l)	110	174	365	535	502	800
Hauteur du tube extérieur (m)	0,47	0,51	0,32	0,75	0,32	0,52
Puits de pompage FE1 : . Profondeur 87,5 m . Cote de la pompe - 35 m						

## 22.523 - Réalisation des marquages

### Choix des traceurs

Les traceurs sélectionnés pour les injections multiples et simultanées réalisées dans les piézomètres sont les suivants :

- . l'iode sous forme d'iodure de sodium en solution
- . le zinc sous forme (E.D.T.A.) en solution
- . le nickel sous forme (E.D.T.A.) en solution
- . l'acide aminé G en solution
- . le cérium (E.D.T.A.) en solution
- . la rhodamine Wt en solution

### Injections des traceurs

Chacun des six traceurs sélectionnés a été injecté dans un des six piézomètres de la "flûte de Pan", le 11/6/1986 entre 9h et 10h15, alors que le niveau du rabattement créé par le pompage était à + 5 % du niveau de stabilisation final.

Les injections ont été réalisées avec une pompe péristaltique et un tuyau vinyl descendu dans la zone non tubée des piézomètres.

Pour chaque injection, le traceur était dilué dans 5 litres d'eau, puis le récipient et le système d'injection étaient rincés avec environ 8 litres d'eau propre.

Les masses de l'élément ou du composé dosé au laboratoire, les quantités du produit injecté et les dates d'injection, sont collectées dans le tableau 2 .

Par ailleurs, au vu de la lenteur de la disparition des traceurs injectés dans FP1 et FP2 et de l'insuffisance des quantités injectées qui en découle pour qu'il soit possible de déceler quelque relation entre ces piézomètres et le puits de pompage, il a été décidé de renouveler les injections dans FP1 et FP2 avec des traceurs différents et des masses plus grandes.

L'une a eu lieu le 19/6/1986 à 18h dans FP1 avec 2 kg d'iodure de sodium, contenant 1,7 kg d'iode. L'autre a eu lieu le 10/7/1986 à 11h dans FP2 avec 50 g d' amino G-acid.

- Traceurs injectés dans les piézomètres				
Piézomètre	Date et Heure d'injection	Traceur	Masse de l'élément dosé	Masse du composé
FP1	11/6 - 9h	Nickel (EDTA)	5,5 g	50 g
	19/6 - 18h	Iode INa	1700 g	2000 g
FP2	11/6 - 9h15	Cérium (EDTA)	100 g	100 g
	10/7 - 11h	Amino G-acid	50 g	50 g
FP3	11/6 - 9h30	Zinc (EDTA)	286 g	2000 g
FP4	11/6 - 9h45	Rhodamine Wt	50 ml	50 ml
FP5	11/6 - 10h	Amino G-acid	10 g	10 g
FP6	11/6 - 10h15	Iode INa	850 g	1000 g

## 22.524 - Résultats des marquages

### Débits de disparition des traceurs dans les piézomètres

#### Principe de la mesure

Lorsqu'un traceur, de l'eau, est injecté dans un forage et qu'il est homogénéisé en permanence dans celui-ci, sa fonction de disparition due aux écoulements souterrains, suit une loi exponentielle de la forme :

$$C = C_0 \cdot e^{-\alpha \cdot t}$$

où C = concentration à un instant t

C<sub>0</sub> = concentration origine (t = 0)

Le terme  $\alpha$  prend en compte la vitesse  $V_i$  et la géométrie  $S/V$  de l'écoulement observé :  $\alpha = \frac{V_i \times S}{V}$  avec :

$V$  : volume d'eau contenu dans le tronçon de piézomètre ou le traceur est homogénéisé

$S$  : la section de l'écoulement interceptée par le tronçon débitant du piézomètre

En général  $S = D \cdot \epsilon \cdot H$  avec :

$D$  : diamètre du forage

$H$  : hauteur du tronçon débitant

$\epsilon$  : un terme correctif de  $D$ , égal à 2 lorsque le forage n'est pas équipé de tube crépiné et que le milieu est homogène ; (il peut être inférieur à 1 dans le cas d'une fracture)

Le produit  $V_i \times S$  représente le débit  $Q$  de l'écoulement dans le tronçon débitant et par suite  $\alpha = \frac{V_i \times S}{V} = \frac{Q}{V} = \frac{1}{\tau}$

$\tau = \frac{V}{Q}$  étant le temps de séjour moyen du traceur dans le forage.

En pratique, on détermine  $\tau$  à partir de la fonction de disparition observée, et, connaissant  $V$  on en déduit  $Q$  et éventuellement  $V_i$ .

Il convient de tenir compte de ce qu'une partie de l'évolution de la concentration provient d'une part, de l'homogénéisation progressive du traceur sur toute la hauteur mouillée du forage, d'autre part, d'une perte de traceur dans le volume de 1,15 litre soutiré à chaque prélèvement.

Cependant, la pondération de  $Q$  par la hauteur non tubée  $H$  des piézomètres risque de donner des valeurs de  $V_i$  (vitesse résultante des écoulements naturels et du pompage) non représentatives de la réalité qui nous occupe. En particulier,



-  $V_i$  est une vitesse apparente. La vitesse réelle dépend de la porosité cinématique  $m_e$  ; pour  $m_e = 10\%$  ou  $1\%$ , la vitesse réelle est 10 fois ou 100 fois supérieure à la vitesse apparente,

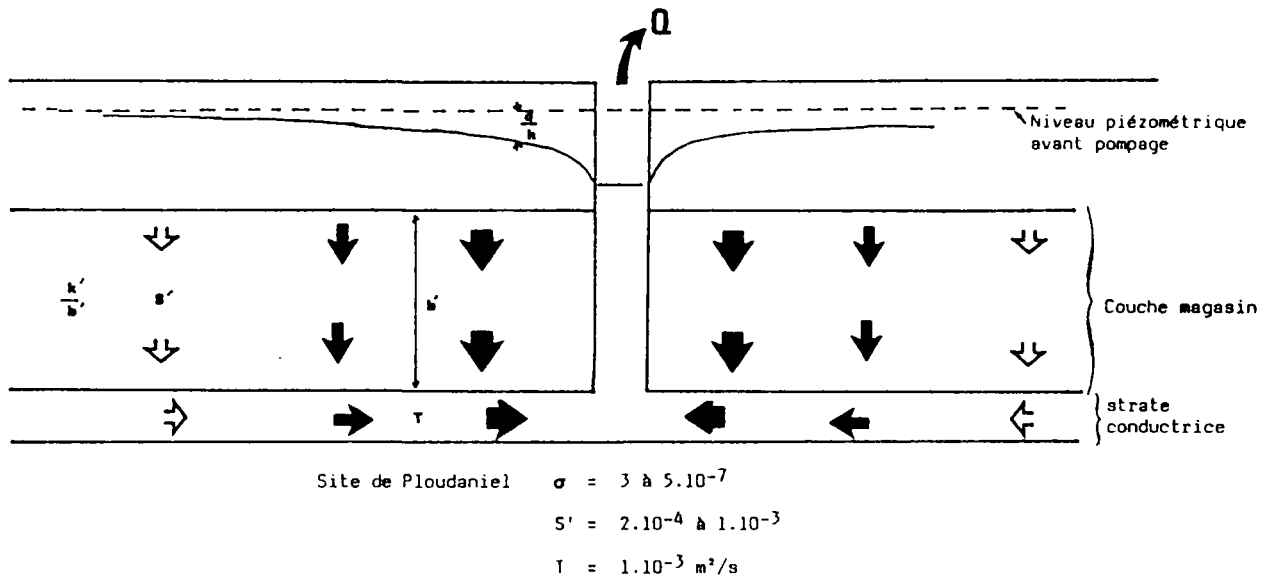
- toutes choses égales par ailleurs, la vitesse dépend directement du gradient hydraulique, proche ici de  $40\%$ . En écoulement naturel (ou suffisamment loin de l'influence directe d'un pompage), le gradient hydraulique est facilement 10 à 50 fois plus faible, les vitesses y sont donc également 10 à 50 fois plus faibles.

Les deux remarques précédentes vont dans le sens d'une compensation, toutefois, les résultats qui suivent, concernant  $V_i$  ne sont donnés qu'à titre indicatif, en tant qu'ordre de grandeur.

N° du piézomètre	Q débit de disparition	$V_i$
FP1	4 l/j	$0,83 \cdot 10^{-2}$ m/j
FP2	18,7 l/j	0,132 m/j
FP3	1,46 l/j	$0,388 \cdot 10^{-2}$ m/j
FP4	68 l/j	$7 \cdot 10^{-2}$ m/j
FP5	8600 l/j	14,2 m/j
FP6	48 l/j	$7,37 \cdot 10^{-2}$ m/j

Il est intéressant de noter que si PF4 et FP5 sont directement "branchés" sur le forage pompé, l'écoulement observé à FP6 est une composition de l'effet du pompage et des écoulements naturels de la nappe.

Le modèle hydraulique retenu pour schématiser l'aquifère de Ploudaniel (note 86-04 de février 1986) est très simplifié :



Dans la réalité, des conducteurs d'importances diverses peuvent exister, et existent, à tous les niveaux, en communication directe ou non avec le conducteur principal capté. Ainsi, FP4 intercepte un conducteur à faible débit qui débouche directement sur la strate captée. A l'inverse, FP6 intercepte un conducteur important (débit instantané,  $26 \text{ m}^3/\text{h}$  à  $97 \text{ m}$ ) qui, bien que très proche, n'est pas en communication directe avec la strate principale captée par F.E.

#### Restitution des traceurs dans le puits de pompage

Les fonctions concentration-temps de restitution des traceurs dans FE1 sont tracées à partir des mesures de leurs concentrations, faites en laboratoire, sur des échantillons d'eau prélevés régulièrement sur un piquage aménagé à la sortie du forage.

La collecte de ces échantillons d'eau s'est faite, automatiquement, à l'aide d'un préleveur automatique, durant le premier mois d'observation, puis manuellement, deux fois par semaine, durant les mois de juillet, août et septembre 1986.

Une interruption de cet échantillonnage a eu lieu, sans graves conséquences, entre le 14/6 vers 15h et le 17/6 à 12h, à la suite de la fermeture de la vanne de sortie du piquage.

Les principales caractéristiques des réponses impulsionnelles et les taux de restitution des traceurs des fonctions expérimentales sont collectés dans le tableau ci-après

- Caractéristiques des réponses impulsionnelles et taux de restitution des traceurs					
Piézomètre	Traceur	Temps d'arrivée (h)	Sommet (h)	Centre de gravité (h)	Taux de restitution (%)
FP6	Iode	38	190	430	76*
FP5	Amino G-Acid	1	8,6	26	37
				74	75
FP4	Rhodamine Wt	14	59	74	2,8
		90	150	470	30
FP3	Zinc (EDTA)	-	-	-	0
FP2	Cerium(EDTA)	-	-	-	0
	Amino G-acid	-	-	-	0
FP1	Nickel(EDTA)	-	-	-	0
	Iode	1000 à 1300 ?	-	-	-

\* sous la courbe lissée et 96 % sous la courbe expérimentale

On notera que FP4 et probablement FP5 montrent un double système de circulations. L'absence de signal provenant de FP2 peut être attribué à

- une absence de relation entre FP2 et FE1
- une relation par des écoulements très lents (temps d'arrivée supérieur à 3 mois)
- une interaction avec le milieu, en particulier avec les hydroxydes de fer.

L'absence de signal provenant de FP3 est cohérent avec la vitesse de disparition très faible (1,46 l/j).

*En résumé, les vitesses de disparition dans les horizons saturés supérieurs, malgré des incertitudes, sont cohérentes avec les indications fournies par les céramiques. Les temps de parcours, sauf pour les communications les plus directes (FP5, 1ère arrivée pour FP6 et FP4) sont supérieures à 50 heures, dans ces conditions très accélérées par le pompage. Un temps de parcours de 1000 à 1300 heures (arrivée depuis FP1) est sans aucun doute plus conforme à ce qui se passe à proximité immédiate d'un captage. Si on considère une distance 10 fois plus grande (150 m au lieu de 15 m), l'eau qui se trouve*

vers le sommet de la nappe mettra plus de 10 fois plus de temps (plus de 10 000 à 13 000 heures) pour arriver à la pompe. Les travaux de laboratoire ont montré que la dénitrification était totale pour un temps de contact de 50 à 100 heures seulement.

## 22.6 - COMPOSITION DE L'EAU DANS LES ELEMENTS DE LA FLUTE DE PAN

La Flûte de Pan n'est pas une colonne de laboratoire : le matériel n'y est pas homogène, les circulations y sont complexes, le flux d'azote n'y est pas constant ; en particulier, l'eau qui sort aujourd'hui sans nitrates, on ignore ce qu'était sa concentration initiale. Par ailleurs, on sait que même en FP1, la dénitrification est déjà présente. Cependant, si les deux outils ne sont pas identiques, les informations qu'ils fournissent doivent être comparables.

Dans le tableau qui suit sont regroupés les "indicateurs de dénitrification":

NO <sub>3</sub> mg/l	NO <sub>2</sub> mg/l
SO <sub>4</sub> mg/l	Fe mg/l

pour les 8 séries de prélèvements effectués (analyses par ENSP). La mention 0 (zéro), signifie une teneur inférieure au seuil de détection (0,01 mg/l pour NO<sub>2</sub>, 0,5 ou 1 mg/l pour NO<sub>3</sub>).

On constate :

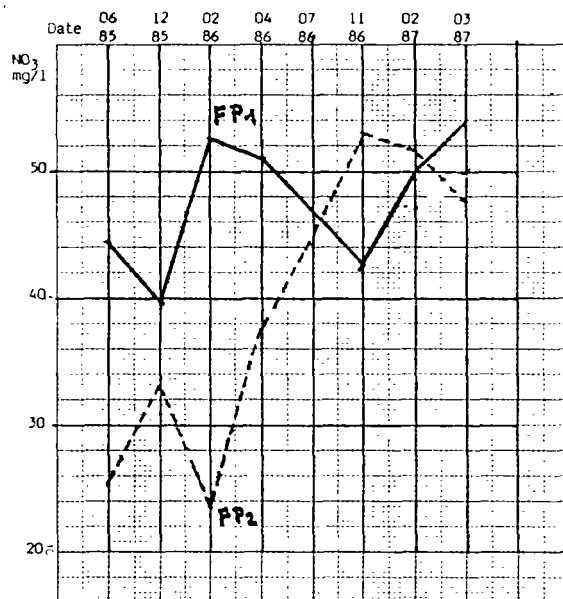
- la dénitrification est complète en FP3 les 21.6.85, 24.12.85, 30.4.86 et 9.7.86. Le 24.2.86, elle n'est complète que en FP4. Pour les trois derniers prélèvements, elle ne semble pas parfaitement achevée au niveau de FP3.

Date prélèvt N° FP	21.6.85	24.12.85	24.2.86	30.4.86	9.7.86	21.11.86	6.2.87	20.3.87
FP 1	44,2 0,32 24	39,7 0,25 28	52,6 0,04 20 0,35	51 0 24 0,87		42,5 0,15 33 0,73	50 0 20 0,45	53,7 0 23 0,4
FP 2	25,4 0,25 40	32,8 0,85 41	23,7 0,07 61 0,26	37,5 0,95 49 0,23		53 0,05 30 0,25	51,6 0,02 47 0,4	47,5 0 50 0,6
FP 3	0,5 0 17	0,6 0,02 42	31,4 0 28 2,5	0,5 0,01 60 0,77	0 0 60 0,5	1,6 0,24 65 0,25	1,6 0 53 1	1,3 0 56 0,85
FP 4	0,7 0 48	0,5 0 50	0 0 50 3,5	0 0 47 1,8	0 0 38 2,95	0,5 0 51 2,65	0 0 50 6,25	0,3 0 53 13
FP 5	0,7 0 43	0,4 0 41	0 0 38 3	0,5 0,01 39 0,62	0 0 43 5,4	3,4 0,02 41 6,8	0 0 48 15	0,2 0 54 2,6
FP 6	0,8 0,01 54	0,5 0 45	0 0 43 2,6	0 0 43 1,18	0 0,48 48 3,9	0,6 0,05 58 9,8	0 0 56 12,5	0,2 0 64 8,8

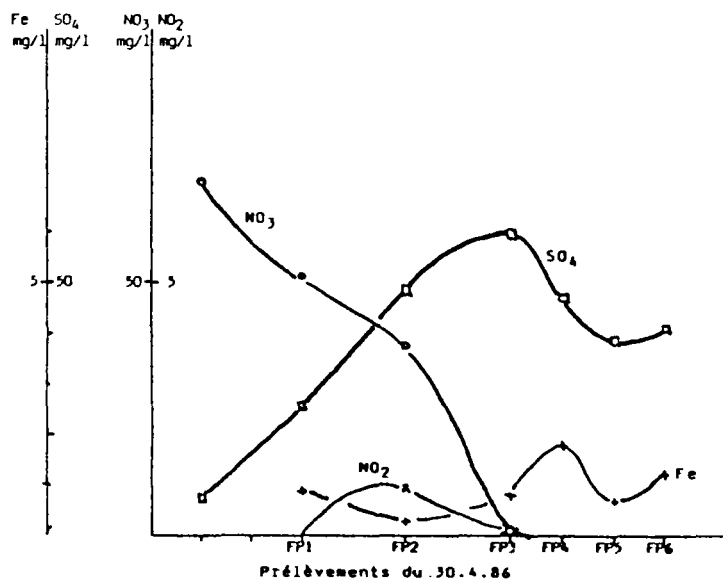
F E	1,8 0,05 47 2,2				0 0,01 44 4,15	5 0,02 53 2,8	0 0 49 6,75	0,8 0 51 4,8
-----	--------------------	--	--	--	-------------------	------------------	----------------	-----------------

- La teneur en  $\text{NO}_3$  montre une tendance à la hausse dans FP1 et FP2, plus dans FP1. Il peut s'agir d'une réelle tendance, ou d'une évolution fluctuante et réversible.

Il y a probablement un lien entre ces deux constatations : augmentation du flux de nitrates à traiter venant des horizons supérieurs, perte d'efficacité du matériel dénitrifiant par diminution du stock de réactif ou fluctuation d'un ou plusieurs paramètres influant sur la réaction ?



Malgré le manque d'homogénéité du terrain, le fait que les divers éléments de la flûte de Pan n'interceptent pas une même ligne de courant, l'instrument fournit des valeurs permettant de construire des profils très comparables (plus ou moins selon la série de prélèvements considérée) aux profils issus des colonnes ou du pilote de laboratoire, comme en témoigne l'exemple suivant.

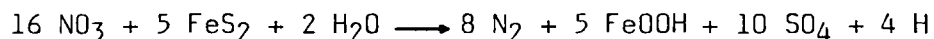


Les observations et mesures sont, certes, à poursuivre, pour savoir comment va évoluer le système et s'il ne va pas montrer de modifications défavorables. Dans l'état actuel des connaissances, le laboratoire et le terrain se rejoignent de façon tout-à-fait satisfaisante, leurs données et résultats convergent de façon apparemment très significative, et on peut admettre la réalité de la dénitrification naturelle, par réaction entre la pyrite et les nitrates, facilitée et amplifiée par *Thiobacillus* dénitrifiants. Cette dénitrification existe à Ploudaniel et, par extension, aux autres sites où on a pu reconnaître en cours de foration les variations de concentration des  $\text{NO}_3$ ,  $\text{SO}_4$ , Fe et  $\text{NO}_2$  que l'on peut considérer comme représentatives.

Quelles peuvent être les conséquences des phénomènes de dénitrification naturelle pour les exploitants, peut-on estimer la durée de vie du processus, existe-t-il - ou peut-on mettre au point - des méthodes pour prévoir les secteurs où il y a dénitrification en profondeur ?

3 - CONSEQUENCES DE LA  
DENITRIFICATION NATURELLE





### 31 - Consommation et production de matière

Sans tenir compte de l'évolution de la bio-masse, la dénitrification d'une eau à 80 mg/l  $\text{NO}_3$  consomme 48 mg de pyrite par litre d'eau traité, produit 77 mg  $\text{SO}_4$  et 36 mg FeOOH. Une partie du fer est évacuée avec l'eau pompée (3 mg/l  $\text{Fe}^{++}$ ), environ 34 mg FeOOH doit précipiter dans le terrain.

Pour une exploitation de 1 000 m<sup>3</sup>/jour (300 000 m<sup>3</sup>/an), la dénitrification naturelle de l'eau initialement à 80 mg/l  $\text{NO}_3$  consomme, par an, 14,4 tonnes, soit environ 3 m<sup>3</sup> de pyrite.

Le volume de terrain intéressé peut être estimé à 50 millions de m<sup>3</sup> (1 km<sup>2</sup> x 50 m d'épaisseur) ; le volume des vides supplémentaires créés est négligeable.

Pendant la même durée, environ 10 tonnes de FeOOH précipitent dans le terrain, par exemple sous forme de limonite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3, \text{H}_2\text{O}$ ) de densité moyenne 3,8, soit environ 2,6 m<sup>3</sup> (sans tenir compte d'un certain foisonnement probable).

### 32 - Hypothèse de durée de vie du réacteur naturel

Si on suppose que le réservoir aquifère de 50 millions de m<sup>3</sup> de terrain a une teneur moyenne en pyrite comprise entre 0,01 et 0,1 g par kg, le réservoir, à une densité de l'ordre de 2,7 pèse 135 millions de tonnes et contient 1350 à 13500 tonnes de pyrite, soit, pour une consommation annuelle de 14,4 tonnes, de quoi fonctionner 94 à 940 ans.

Ceci n'est bien entendu qu'une approximation très grossière, il serait certainement très important de pouvoir estimer la teneur en pyrite du sous-sol de Ploudaniel.

### 33 - Conséquences pour les forages d'exploitation

La précipitation du  $\text{FeOOH}$  produit n'est pas instantanée, il reste un certain temps sous forme dissoute, puis sous forme de particules en suspension avant de sédimenter ; l'eau qui le contient se déplace, d'autant plus vite qu'on est près du forage en pompage. On pourrait alors avoir une tendance au dépôt, donc au colmatage, d'autant plus marquée qu'on se trouve près du forage. Dans le cas de Ploudaniel, où cinq forages sont en exploitation depuis 2,5 ans (FC1 et FC2) ou 1 an (FE1, FE2, FE3), il serait important de vérifier l'état des ouvrages et le comparer à l'état initial afin de se rendre compte si le colmatage prévisible s'est effectivement produit et définir son degré.

#### 4 - DETECTION DES SECTEURS DENITRIFIANTS

## 41 - A partir des forages existants

### 41.1 - Cas du secteur de Plouénan

Cette démarche a précédé les recherches d'eau souterraine de bonne qualité réalisées ensuite pour le compte du Syndicat Mixte de distribution de l'Horn. A l'époque (fin 1984), la dénitrification naturelle n'était que pressentie, son mécanisme n'était pas connu, on constatait simplement qu'il paraissait exister une incompatibilité entre  $\text{NO}_3$  et Fe dans les eaux souterraines.

78 forages existants, d'une profondeur moyenne de 40,2 m ont fait l'objet d'analyses (Fe,  $\text{NO}_3$ ).

22 de ces ouvrages ont des teneurs en  $\text{NO}_3$  inférieures à 50 mg/l (dont 10 < 25 mg/l), sur ces 22 ouvrages, 14 présentent des teneurs en fer supérieures à 0,1 mg/l.

56 forages ont des teneurs en nitrates supérieures à 50 mg/l (dont 30 > 100 mg/l) ; sur ces 56 ouvrages, 7 seulement ont des teneurs en fer supérieures à 0,1 mg/l.

En reportant ces résultats sur cartes, il est apparu que les faibles teneurs n'étaient pas dispersées, mais regroupées en zones assez étendues, aux contours forcément flous et très imprécis. Tous les forages échantillonnés à l'intérieur de ces zones ont des concentrations en nitrates inférieures à 50 mg/l (inférieures à 25 mg/l pour certains). Tous les forages échantillonnés à l'extérieur de ces zones ont des concentrations en nitrates supérieures à 50 ou 100 mg/l.

Neuf sondages de reconnaissances ont été réalisés dans ces *zones présumées saines en profondeur* - d'une profondeur moyenne voisine de 100 m, huit d'entre eux (à Taulé, Henvic, Plouenan) ont effectivement trouvé de l'eau dénitrifiée en profondeur. Un échec a été rencontré (Cléder, sondage de 100 m de profondeur, 123 mg/l  $\text{NO}_3$  dans l'eau).

LOCALISATION DE LA ZONE PRESUMEE SAIN EN PROFONDEUR



#### 41.2 - Cas du secteur de Ploudalmézeau

Une démarche comparable, sur financement B.R.G.M., a été tentée en 1984 étant cette fois dosé, dans la région de Ploudalmézeau.

26 forages de particuliers ont été examinés, pour lesquels on ne connaît pas l'évolution des teneurs en  $\text{NO}_3$  avec la profondeur ; la profondeur moyenne est de 28 m (extrêmes : 10 m et 60 m) ; les teneurs en nitrates varient de 18 à 145 mg/l  $\text{NO}_3$  ; seuls 4 forages ont des teneurs inférieures à 50 mg/l. Peut-on en conclure que les phénomènes de dénitrification sont très rares autour de Ploudalmézeau ? En fait

- les forages de Ploudalmézeau sont peu profonds (11,5 m de moins que dans la région de Plouévan - st Pol de Léon), ils ont été arrêtés dès que l'objectif fixé au foreur était atteint (le plus souvent, l'obtention d'un débit instantané de 3 à 5 m<sup>3</sup>/heure)

- lorsqu'elle existe, la dénitrification se réalise à une certaine profondeur : le plus souvent semble-t-il entre 20 et 50 m. Si on suppose pour simplifier (une telle simplification est certainement très proche de la vérité dans de nombreux cas), qu'un forage a rencontré 2 venues d'eau : une venue d'eau "supérieure" de 2 m<sup>3</sup>/h à 105 mg/l NO<sub>3</sub> et une venue d'eau inférieure complètement dénitrifiée (0 mg/l NO<sub>3</sub>) de 1 m<sup>3</sup>/h, globalement on dispose de 3 m<sup>3</sup>/h à la teneur moyenne de 70 mg/l NO<sub>3</sub>.

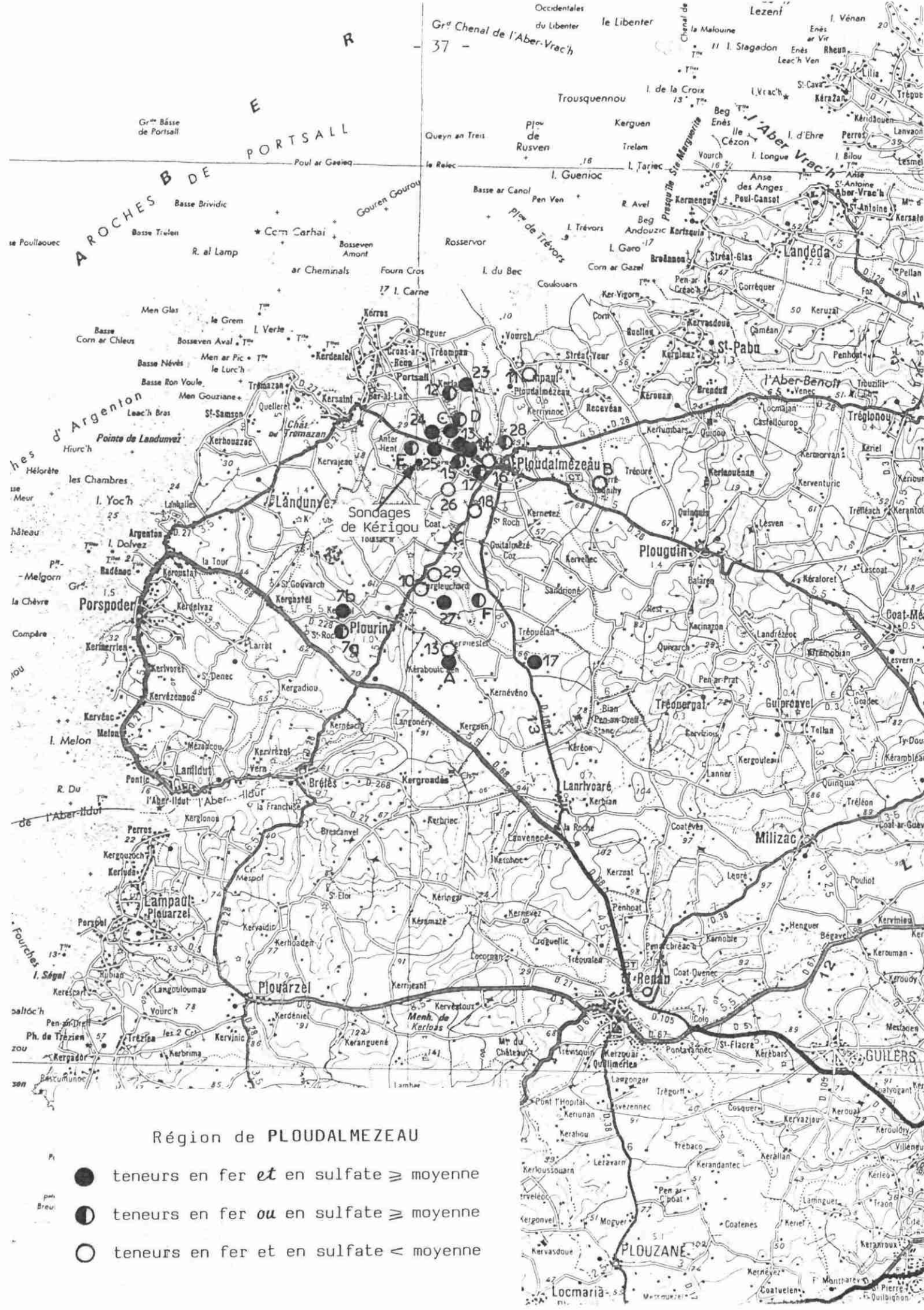
Considérant que, pour des forages peu profonds, la seule concentration n'était pas représentative d'une dénitrification qui pouvait n'être qu'amorcée à la profondeur atteinte, on a cherché l'existence d'autres indices. Compte tenu de ce que l'on sait des réactions, on peut penser qu'une dénitrification amorcée ou n'affectant qu'une partie des venues d'eau doit se manifester par des teneurs en fer et, en sulfates "anormales".

En définissant arbitrairement la limite entre les concentrations "normales" et "anormales" comme étant la valeur médiane observée localement (0,08 mg/l pour Fe, 44 mg/l pour SO<sub>4</sub>), on subdivise les 26 forages examinés à Ploudalmézeau, en trois groupes

*Premier groupe* - 10 forages à double critère (ronds noirs sur l'extrait de carte) : Fe  $\geq$  0,08 mg/l *et* SO<sub>4</sub>  $\geq$  44 mg/l. On remarque que les 4 forages à moins de 50 mg/l NO<sub>3</sub> sont dans ce groupe.

Profondeur m	NO <sub>3</sub> mg/l	Fe mg/l	SO <sub>4</sub> mg/l
41	101	0,08	44
20	<b>43</b>	0,12	45
47	77	0,38	65
20	<b>18</b>	0,08	60
28	<b>44</b>	1,6	68
20	81	0,11	55
20	<b>34</b>	0,12	49
20	123	0,09	44
60	77	0,08	44
27	53	0,15	45

A priori, il y a de bonnes probabilités pour que les zones où ont été réalisés ces forages soient *dénitrifiantes* ; des venues d'eau plus profondes - dans la mesure où elles peuvent exister - seraient très probablement en mesure de diluer les fortes concentrations des venues d'eau peu profondes (qui, à l'exploitation, devraient de toute façon être isolées par cimentation des annulaires).



Région de PLOUDALMEZEAU

- teneurs en fer *et* en sulfate  $\geq$  moyenne
- ◐ teneurs en fer *ou* en sulfate  $\geq$  moyenne
- teneurs en fer *et* en sulfate  $<$  moyenne

*Deuxième groupe* - 8 forages à critère unique (ronds demi-noirs sur l'extrait de carte) :  $Fe \geq 0,08$  mg/l ou  $SO_4 \geq 44$  mg/l.

Profondeur m	NO <sub>3</sub> mg/l	Fe mg/l	SO <sub>4</sub> mg/l
30	84	0,06	65
40	61	0,83	34
37	75	0,06	48
20	60	0,03	100
32	77	0,09	20
17	57	0,04	48
10	51	0,08	37
32	73	0,04	71

Il est possible que les secteurs où sont implantés ces forages soient également "dénitrifiants" en profondeur ; les probabilités paraissent moins fortes que pour les forages du premier groupe. On remarquera cependant que les ouvrages des premier et deuxième groupe sont géographiquement groupés.

*Troisième groupe* - 8 forages sans indice (ronds blancs de l'extrait de carte):  $Fe < 0,08$  mg/l et  $SO_4 < 44$  mg/l.

Profondeur m	NO <sub>3</sub> mg/l	Fe mg/l	SO <sub>4</sub> mg/l
20	55	0,05	41
35	84	0,06	30
20	64	0,05	38
20	79	0,06	30
25	51	0,06	39
16	75	0,05	23
32	78	0,06	13
29	145	0,04	43

Avec les critères que l'on s'est défini en choisissant les seuils de normalité , ces ouvrages ne montrent aucun indice de dénitrification naturelle en profondeur. Tout semble se passer comme si - cf. extrait de carte - deux zones présumées saines en profondeur existaient, l'une à l'W et N.W. de Ploudalmézeau, l'autre au S (Plourin), avec entre elles, une assez large bande de terrain sans présomption que l'on puisse trouver de l'eau de bonne qualité en profondeur.



Cependant, en restant dans le domaine des hypothèses, si on considère les valeurs moyennes :

	Forages 1er groupe	Forages 2ème groupe	Forages 3ème groupe
Profondeur moyenne m	30,3	28,5	24,4
NO <sub>3</sub> mg/l concentration moyenne	64	67	79

On constate une parallélisme certain entre les profondeurs et les concentrations laissant supposer que tout le secteur de Ploudalmézeau-Plourin pourrait être dénitrifiant, le paramètre limitant étant la profondeur des forages.

Le parallélisme ci-dessus peut également n'être qu'une apparence et résulter d'une coïncidence. Aussi bien, ce qui précède ne constitue pas une démonstration, mais la recherche d'indications, d'indices, susceptibles d'augmenter les chances de trouver de l'eau de bonne qualité en profondeur. Dans le secteur de Ploudalmézeau-Plourin, dans l'état actuel des connaissances, on peut raisonnablement penser que de l'eau naturellement dénitrifiée existe en profondeur ; les présomptions sont fortes au Nord et Nord-Ouest de Ploudalmézeau, ainsi qu'au Sud (Plourin) tandis que dans la zone intermédiaire, les indices sont plus ténus.

Deux sondages de reconnaissance, suivis par un forage et un pompage d'essai d'un mois réalisés à Kérigou en Ploudalmézeau (réalisation antérieure à cet inventaire) ont effectivement trouvé de l'eau dénitrifiée en profondeur, ce qui va dans le sens d'une confirmation de l'intérêt des indices indirects (concentration en NO<sub>3</sub> éventuellement élevée, mais concentrations en SO<sub>4</sub> et Fe "anormales")

#### 42 - En l'absence de forages existants

En fait, on a utilisé les connaissances fournies par 10 forages, les uns "dénitrifiants", les autres "non dénitrifiants" pour tester les méthodes géochimiques. Ce travail a été réalisé sur fonds B.R.G.M.

## 42.1 - Pourquoi l'intervention de la géochimie ?

Le problème est de prévoir la présence de sulfure disséminé dans les formations du sous-sol. On est donc confronté, en partie, au même problème que celui de la recherche minière pour lequel la *Géochimie* constitue un outil souvent efficace.

### Cas des sulfures des métaux de base

Effectivement, *la géochimie est capable de déceler la présence de sulfures de métaux de base* (Pb, Zn, Cu) dans le sous-sol en mettant en évidence des *anomalies* dans les *sols* correspondants. Les métaux sont souvent accompagnés de traceurs caractéristiques (As, Ag, Bi, MO...). Mais certains éléments peuvent avoir une origine uniquement lithologique (Cu, Zn, As...) et donner lieu à des anomalies formationnelles. C'est alors que l'analyse multiélémentaire prend tout son intérêt.

En effet, grâce aux associations d'éléments, une discrimination devient possible entre les anomalies formationnelles, les anomalies en liaison avec des sulfures et métaux de base et aussi les anomalies en liaison avec des oxydes primaires. Cette discrimination sera également facilitée par la connaissance de la lithologie.

### Cas des sulfures de fer

Par contre, *pour les sulfures de fer, le diagnostic est plus difficile*. En effet, le fer décelé dans les sols a le plus souvent une origine lithologique car les minéraux ferrifères autres que les sulfures sont souvent abondants dans les roches (oxydes, carbonates et surtout silicates).

## 42.2 - Réalisation des tests

### Choix des sites

Un *test* est effectué sur *10 sites de forages* de la région de PLOUDANIEL et St POL DE LEON parmi lesquels 6 ont fourni de l'eau dénitrifiée et 4 de l'eau non dénitrifiée. Le sous-sol des premiers contient des sulfures disséminés, celui des seconds en est dépourvu.

### Echantillonnage

A partir du point de forage, les échantillons sont prélevés à des distances de 10,25 et 50 mètres, dans *l'horizon B* à une profondeur comprise entre 0,25 et 1,2 mètre selon l'épaisseur des *sols*. Au total, 94 échantillons ont été recueillis et analysés.

## Analyse

La fraction inférieure à 125 microns des échantillons est soumise à une *analyse multiélémentaire* (ICP) pour 34 éléments dont les résultats complets sont fournis dans l'annexe 1.

## Traitement des résultats

Un fichier des résultats est constitué, permettant différents *traitements informatiques*, parmi lesquels ont été retenus :

- la comparaison des moyennes des différents éléments entre les sites "dénitrifiants" et les sites "non dénitrifiants",
- la comparaison des moyennés des différents éléments entre les 11 sites échantillonnés,
- des diagrammes binaires.

## 42.3 - Interprétation des résultats

### Eléments significatifs de sulfures

L'interprétation des résultats est en cours. pour l'instant, il semble que

- lorsque l'absence de dénitrification est nette (ex.: Plounevez-Lochrist, Cleder), la réponse géochimique est également nette : les éléments majeurs reflètent l'environnement lithologique, les éléments traces montrent des valeurs conformes à celles habituellement rencontrées en zones non minéralisées - il n'y a pas de "signature sulfures" dans le sol,

- lorsque le site est dénitrifiant, si l'épaisseur de recouvrement est faible (cas de Ploudaniel), la présence de certains éléments ou associations d'éléments indique clairement l'existence de sulfures dans le bed-rock. Par contre, si l'épaisseur de recouvrement est importante (cas de Plouénan S3 et S6 : 6 à 13 m de recouvrement probablement alloctone), la réponse peut être faible et peu significative.

Sous réserve de ce qu'indiqueront les résultats définitifs et avec des limitations dues aux recouvrements, la géochimie multi-éléments doit pouvoir être utilisée, soit pour balayer rapidement un grand territoire et y reconnaître les secteurs où le bed-rock contient des sulfures, soit pour, autour d'un captage dénitrifiant existant, définir la surface au sol de l'aquifère dénitrifiant exploité.

5 - EXPLOITATION DE L'EAU SOUTERRAINE  
PAR LA COOPERATIVE

La Coopérative assure la fourniture de ses besoins par cinq forages , en service depuis

- août 1984 pour FC1
- octobre 1984 pour FC2
- avril 1986 pour FEI
- mai 1986 pour FEII et FE III

Les prélèvements d'eau souterraine ont été de 228 000 m<sup>3</sup> en 1985 et 296 000 m<sup>3</sup> en 1986. Au cours des 6 derniers mois de 1986 (alimentation de la Coopérative entièrement par l'eau souterraine), la consommation moyenne a été pratiquement de 30 000 m<sup>3</sup> par mois.

### Réponse de la nappe

Le réseau de mesure est constitué par 16 piézomètres et 5 repères sur cours d'eau. Les cinq forages d'exploitation ont été rattaché au nivellement de l'ensemble, mais aucune mesure de niveau n'y est possible (absence de tube pour le passage des sondes).

L'amplitude des mouvements reste très faible. En FP5, dont on sait qu'il est en relation directe et rapide avec le forage d'exploitation FEI proche (15 m), l'abaissement maximum ne dépasse pas 5,7 m ; en III2, piézomètre très proche du forage d'exploitation FEII, l'abaissement maximum n'est que de 4,63 m. Les piézomètres F2 et F4 n'ont pu être intégrés au réseau que récemment (février 1987), on ne connaît pas l'amplitude des mouvements qui y existent.

Pour l'instant, ces fluctuations indiquent que les prélèvements effectués sont loin d'approcher la limite des ressources disponibles de la nappe sollicitée ; elles restent trop faibles pour qu'on puisse les quantifier en terme de "variation des réserves".

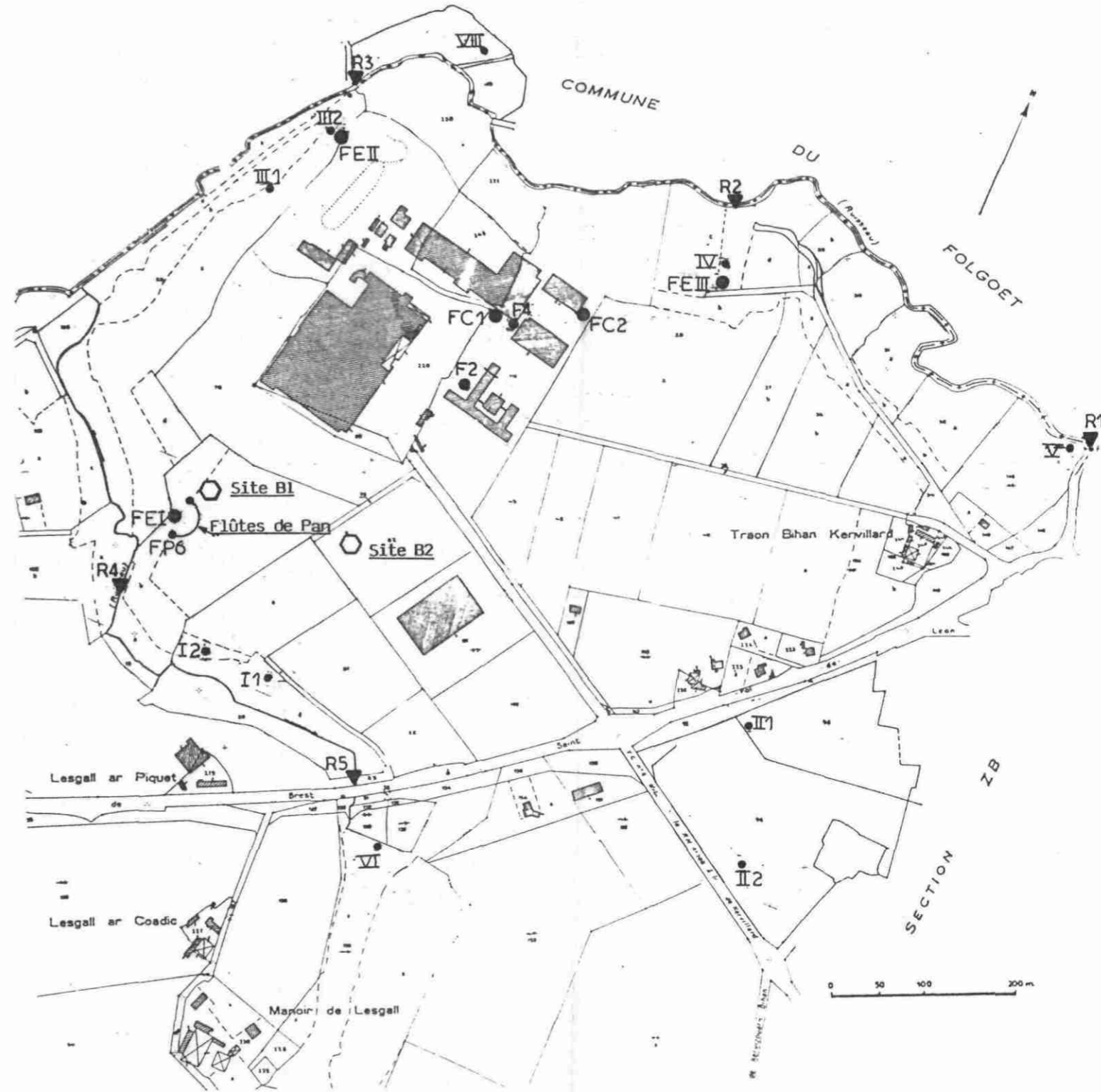
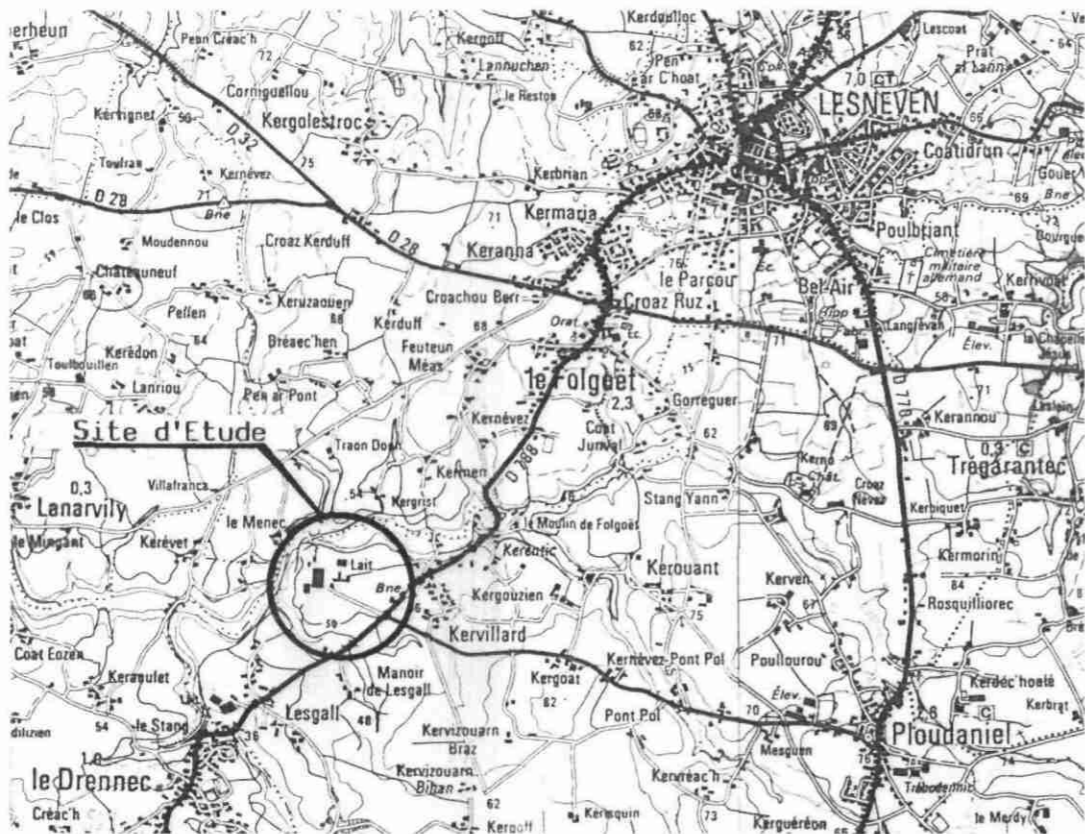
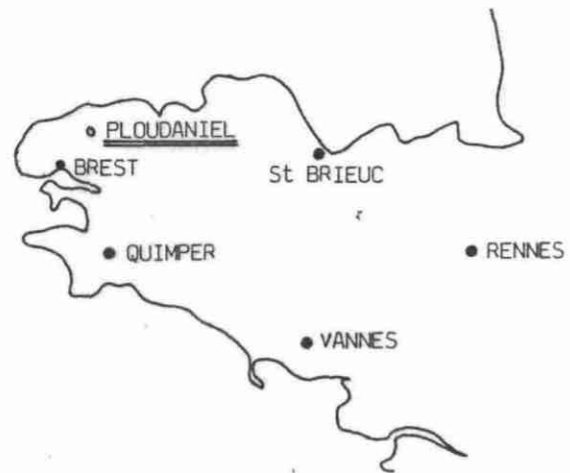
N° ou- vrage	DATE	26/02/86	25/04/86	5/06/86	20/06/86	9/07/86	27/08/86	17/11/86	5/02/87	19/03/87	29/04/87
		Altitude repère(m)	Prof.Nappe(m) Alt. Nappe(m)	Prof.Nappe(m) Alt. Nappe(m)	Prof.Nappe(m) Alt. Nappe(m)	Prof.Nappe(m) Alt. Nappe(m)	Prof.Nappe(m) Alt. Nappe(m)	Prof.Nappe(m) Alt. Nappe(m)	Prof.Nappe(m) Alt. Nappe(m)	Prof.Nappe(m) Alt. Nappe(m)	Prof.Nappe(m) Alt. Nappe(m)
FP 1	47,59	8,07	9,75	10,67	11,96	12,51	13,75	9,73	11,28	10,94	10,17
		39,52	37,84	36,92	35,63	35,08	33,84	37,86	36,31	36,65	37,42
FP 2	47,77	8,29	10,17	11,26	12,42	12,99	14,25	10,08	11,60	11,68	10,57
		39,48	37,60	36,51	35,25	34,78	33,52	37,69	36,17	36,09	37,20
FP 3	47,05	5,89	9,615	10,29	11,57	12,155	13,45	9,42	10,73	10,46	9,97
		41,16	37,435	36,76	35,48	34,895	33,60	37,63	36,32	36,59	37,08
FP 4	47,32	7,86	9,64	10,48	11,53	12,123	13,46	9,72	11,00	10,50	10,17
		39,46	37,68	36,84	35,79	35,197	33,86	37,60	36,32	36,82	37,15
FP 5	47,44	8,00	9,795	10,88	11,75	12,35	13,70	9,77	11,42	10,575	10,31
		39,44	37,645	36,56	35,69	35,09	33,74	37,67	36,02	36,865	37,13
FP 6	47,67	7,23	8,85	9,43	11,40	10,99	12,17	8,86	9,62	9,375	9,51
		39,44	37,645	37,24	35,27	35,68	34,50	37,81	37,05	37,295	37,16
FC 1	55,69	non mesurable	non mesurable	non mesurable	non mesurable	non mesurable	non mesurable	non mesurable	non mesurable	non mesurable	non mesurable
FC 2	55,12	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
FE I	45,93	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
FE II	36,35	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
FE III	35,255	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
I 1	41,685	1,68	2,095	2,43	2,995	3,32	4,16	2,19	2,01	2,14	2,43
		40,005	39,59	39,255	38,69	38,365	37,525	39,495	39,675	39,545	39,255
I 2	51,565	-	3,62	4,042	4,43	-	5,67	3,60	-	-	3,96
		-	39,35	38,928	38,54	-	37,30	39,37	-	-	39,01
II 2	35,735	Artésien	Artésien	0,44	0,565	0,65	0,93	0,54	Artésien	0,27	0,355
		> 51,565	>51,565	51,125	51,00	50,915	50,635	51,025	>51,565	51,295	51,21
III 1	35,735	2,03	2,30	2,49	2,65	3,03	3,82	2,18	2,605	2,79	2,975
		33,705	33,435	33,245	33,085	32,705	31,915	33,555	33,13	32,945	32,94
III 2	34,445	0,465	1,56	1,61	1,82	3,84	5,10	4,20	3,27	3,62	4,63
		33,98	32,885	32,835	32,625	30,605	29,345	30,245	31,175	30,825	29,815
V	34,145	0,14	0,195	0,53	0,66	0,68	0,77	Artésien	0,235	0,40	0,375
		34,005	33,95	33,485	33,615	33,485	33,375	>34,145	33,91	33,745	33,77
VI	43,56	2,11	2,40	3,51	3,97	3,55	3,90	1,88	2,39	2,95	3,27
		41,45	41,16	40,05	39,59	40,01	39,66	41,68	41,17	40,61	40,29
VIII	32,335	Artésien	Artésien	Artésien	Artésien	0,92	0,48	Artésien	Artésien	0,03	0,305
		> 32,335	>32,335	>32,335	>32,335	31,415	31,855	>32,335	>32,335	32,305	32,03
R 1	34,995	2,31	2,31	2,38	2,41	2,45	2,43	2,13	2,30	2,38	2,39
		32,685	32,685	32,615	32,585	32,545	32,565	32,865	32,695	32,615	32,605
R 2	31,33	0,385	0,345	0,505	0,585	0,61	0,605	0,07	0,305	0,44	0,47
		30,945	30,985	30,825	30,745	30,72	30,725	31,26	31,025	30,89	30,86
R 3	31,765	1,61	1,59	1,70	1,74	1,73	1,76	1,49	1,60	1,65	1,68
		30,155	30,175	30,065	30,025	30,035	30,005	30,275	20,165	30,115	30,085
R 4	37,115			repère	0,765	0,773	0,795	0,75	0,76	0,60	0,71
				détruit	36,35	36,342	36,32	36,365	36,355		36,405
R 5	42,065	0,87	0,81	0,85	0,87	0,88	0,93	0,90	0,88	0,72	0,88
		41,195	41,255	41,215	41,195	41,185	41,135	41,165	41,185		41,185
F 2	55,81								12,40	13,55	13,98
F 4	55,60								43,41	42,26	41,83
									22,48	21,42	23,10
PFC 1	55,62								33,12	34,18	32,50
											27,23
											28,30

PRELEVEMENTS DANS LE DISPOSITIF ACTUEL - en m<sup>3</sup>/mois

		FC1	FC2	FEI	FEII	FEIII	TOTAL CONNU
1984	08	5 458					5 458
	09	4 396					4 396
	10	?	9 806				9 806
	11	?	8 878				8 878
	12	?	10 276				10 276
1985	01	7 124	10 042				17 166
	02	11 264	6 002				17 266
	03	10 939	9 220				20 159
	04	5 892	12 884				18 776
	05	7 085	10 350				17 435
	06	7 603	5 302				12 907
	07	4 427	7 050				11 477
	08	6 826	6 715	(7 321)			20 862
	09	10 181	9 107	(6 016)			25 304
	10	11 141	11 202				22 343
	11	10 720	11 315				22 035
	12	10 912	11 315				22 227
1986	01	9 068	9 302				18 370
	02	6 084	6 177				12 261
	03	10 020	10 492				20 512
	04	6 054	7 583	1 770			15 407
	05	5 654	3 952	2 591	786	9 202	22 185
	06	5 630	2 710	8 657	878	10 300	28 175
	07	7 038	398	10 505	2 614	8 758	29 313
	08	7 599	1 351	10 880	2 875	10 231	32 936
	09	7 019	2 243	9 868	3 889	9 025	32 044
	10	5 437	4 911	10 479	3 135	6 949	30 911
	11	6 649	6 454	3 293	3 835	8 480	28 711
	12	5 562	4 758	4 540	3 144	7 008	25 012
1987	01	6 255	6 494	2 702	3 650	5 693	24 794
	02	4 761	4 672	5 982	3 899	4 811	24 125
	03	5 093	5 383	7 318	4 537	7 313	29 644
	04	6 460	6 589	6 679	4 143	6 823	30 694

Cependant, si les ressources peuvent, globalement, être nettement plus sollicitées, on ignore comment se comporte le dispositif de captage : l'absence de moyens d'y mesurer les niveaux empêche de se rendre compte si les divers pompages sont équilibrés et s'il n'y a pas de risque, voire d'amorce de surexploitation locale. Le problème pourrait se poser pour le secteur FC1 - FC2 - FE III.

COOPERATIVE LAITIERE DE PLOUDANIEL (29)  
 LOCALISATION DES OUVRAGES D'EXPLOITATION  
 DES PIEZOMETRES ET DU DISPOSITIF DE MESURES



- FC Forage d'exploitation
- FE Forage d'exploitation
- II1 Piézomètre
- F2 Piézomètre
- ▼ Repère sur cours d'eau
- Dispositif bougies poreuses



## CONCLUSION

La dénitrification naturelle est une réalité qui devrait permettre d'aider à résoudre un certain nombre de problèmes locaux liés à l'excès de nitrates dans les eaux superficielles ou les captages peu profonds.

Certes, en contrepartie de l'absence de nitrates, ces eaux profondes contiennent du fer ; mais les procédés de déferrisation sont bien connus, simples, fiables, non polluants et d'un coût de fonctionnement a priori très acceptable ; les aquifères ferrugineux que, dans un passé proche, on hésitait à mettre en exploitation, devraient maintenant être au contraire recherchés activement. A ce titre, il conviendrait certainement de développer la recherche des indices d'existence d'une dénitrification naturelle en profondeur dans tous les secteurs à problèmes.

Les travaux réalisés sur le site de la Coopérative de Ploudaniel doivent être affinés en continuant notamment à contrôler l'évolution de la qualité de l'eau dans les horizons non saturés et dans l'aquifère. Il pourrait être souhaitable que les analyses réalisées sur l'eau extraite des éléments de la "flûte de Pan", limitées aux indicateurs de dénitrification: pH, NO<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub> et Fe, soient complétées par l'échantillonnage de forages d'exploitation, particulièrement des forages centraux (FC 1 et FC 2), site où les pompages existent depuis 10 ans, de façon à vérifier l'absence d'évolution défavorable et la conformité de la composition de l'eau avec ce qu'on en attend.

L'état des ouvrages d'exploitation, où le processus de dénitrification naturelle tel qu'il est connu laisse présager un début de colmatage, devra être vérifié afin de contrôler la validité des hypothèses.

L'incertitude la plus grande qui subsiste est relative à la quantité de pyrite disséminée dans l'aquifère, conditionnant la durée de vie de la réaction de dénitrification. On recherche actuellement si des méthodes réalistes existent ou peuvent être adaptées pour réduire cette incertitude.



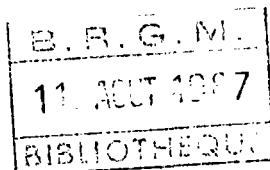
# BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES

ÉTABLISSEMENT PUBLIC A CARACTÈRE INDUSTRIEL ET COMMERCIAL

Service géologique national

SGN/ DOC

N/Réf. : SGR/BRE 87-707



V/Réf. :

Rennes, le 10 août 1987

## BORDEREAU DE TRANSMISSION

Pièces : Rapport 87 SGN 302 BRE (2 ex.)

ETUDE DU DEVENIR DES NITRATES EN PROFONDEUR SUR LE SITE DE LA  
COOPERATIVE DE PLOUDANIEL (29)

Connaissances acquises au 30 avril 1987

Observations :